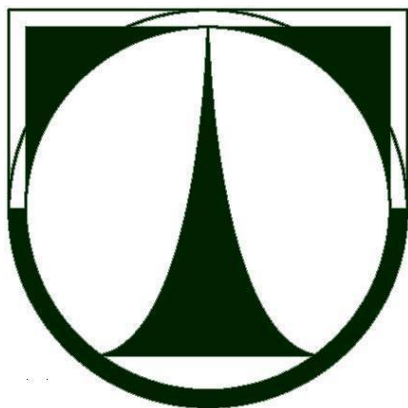


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií



**NÁVRH A OPTIMALIZACE AKUSTICKÝCH SYSTÉMŮ ZALOŽENÝCH  
NA SYNERGII MEMBRÁNOVÉHO A DUTINOVÉHO REZONÁTORU**

Ing. Klára Kalinová, Ph.D.

Habilitační práce

Akreditovaný obor habilitačního řízení: Aplikované vědy v inženýrství

Liberec 2018



## **ABSTRAKT**

Tato habilitační práce je souborem výzkumných aktivit a z nich vyplívajících poznatků jednak pro návrh a realizaci aplikovatelného akustického systému a také pro návrh a realizaci edukativních sestav pro studenty technických oborů. Jednotlivé kapitoly se opírají o publikované příspěvky v impaktovaných časopisech, resp. uvedených v databázích SCOPUS a WEB of SCIENCE, o udělené patenty, realizovaná díla, edukativní sestavy a exponáty. Předmětem výzkumu je v této práci návrh, ověření a optimalizace zvukově pohltivých akustických systémů s rezonanční nanovláknennou membránou. Akustický prvek je založen na pevném rámu (v podobě perforované desky) či flexibilním rámu (v podobě lineárních útvarů či mřížky) ve spojení s nanovláknennou vrstvou, kde plocha nanovláknenné membrány je dána velikostí, tvarem a roztečí perforace, která se, v obecném případě, nemusí svým tvarem a velikostí opakovat v celé ploše a prvek tak sestává z mnoha různých plošek, které umožňují kmitání membrány s výsledkem jedinečných vlastností každé kmitající plochy.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Nanovláknna, rezonátor, membrána, perforace, dutina

## **ABSTRACT**

This habilitation thesis is a collection of research activities and their knowledge for the design and implementation of the applicable acoustic system as well as the design and realization of educational apparatus for students of technical fields. The individual chapters are based on published publications in impacted journals listed in the SCOPUS and WEB of SCIENCE databases, patents, products, educational apparatus and exhibits. The subject of this research is the design, verification and optimization of sound absorbing acoustic systems with a resonant nanofibrous membrane. The acoustic element is based on a rigid frame (in the form of a perforated plate) or a flexible frame (in the form of linear formations or grids) in conjunction with a nanofibrous layer where the area of the nanofibrous membrane is determined by the size, shape and spacing of the perforation, it does not have to repeat its shape and size over the whole surface and the element thus consists of many different surfaces that allow vibration of the membrane resulting in the unique properties of each vibrating area.

## **KEY WORDS**

Nanofibers, resonator, membrane, perforation, cavity

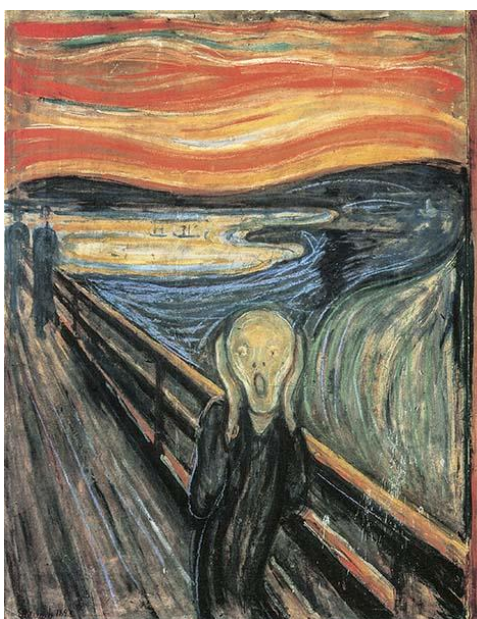
## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji za podporu těm, kteří mě podporovali, podporují a podporovat hodlají nadále.

„Šel jsem po cestě se dvěma přáteli – slunce zapadalo za horu nad městem a fjordem – pocítil jsem nápor smutku – nebe se náhle změnilo v krvavou červeň. Zastavil jsem se, opřel o zábradlí, smrtelně unaven – přátelé se po mně ohlédli a pokračovali dál – díval jsem se nad plápolajícími mraky nad fjordem, byly jak krev a meč, a město – modročerný fjord a město – mí přátelé šli dál a já tam stál a třásl se strachy – cítil jsem jakoby velký, nekonečný výkřik šel tou nekonečnou přírodou“

Edvard Munch

Leden 1892



Výkřik (1893)

Munch, Edvard



# OBSAH

Abstrakt .....	iii
Klíčová slova .....	iii
Poděkování .....	iv
Obsah .....	v
Úvod .....	1
UVEDENÍ PROBLEMATIKY V ŠIRŠÍCH SOUVISLOSTECH.....	2
U.1. Druhy zvukově pohltivých materiálů .....	2
U.1.1. Vláknenné materiály .....	2
U.1.2. Pěnové materiály .....	4
U.1.3. Akustické perforované desky.....	5
U.1.4. Akustické nanovláknenné membrány .....	7
U.2. Návrh akustického prvku .....	9
U.2.1. Aluminiové perforované panely s nanovláknennou vrstvou .....	11
U.2.2. Skelné mřížky s nanovláknennou vrstvou .....	13
U.3. Statistické vyhodnocení dat .....	16
U.4. Navrhované aplikace .....	19
U.5. Realizované akustické prvky .....	20
U.5.1. Perforované panely s nanovláknennou membránou .....	21
U.5.2. Flexibilní mřížky s nanovláknennou membránou .....	22
U.5.3. Barevné řešení nanovláknenné membrány .....	24
KAPITOLA I: Měřicí metody pro stanovení akustických vlastností nanovláknenných membrán .....	25
I.1. Metoda stanovení činitele zvukové pohltivosti pomocí dvou-mikrofonové impedanční trubice.....	25
I.2. Metoda stanovení vložného útlumu pomocí čtyř-mikrofonové impedanční trubice.....	25
I.3. Stanovení rezonančních frekvencí nanovláknenné membrány pomocí optické metody.....	33

KAPITOLA II: Synergie dvou různých rezonančních prvků v jednom akustickém systému.....	47
KAPITOLA III: Využití mřížky/sítky pro ohrazení plochy kmitající nanovlákněné membrány s možností volby velikosti a tvaru kmitající plochy .....	67
KAPITOLA IV: Strukturní parametry nanovlákněné membrány .....	91
IV.1. Plošná hmotnost nanovlákněné membrány .....	91
IV.2. Polymer nanovlákněné membrány .....	92
KAPITOLA V: Edukativní sestava .....	99
V.1. Sestava pro stanovení rezonančních frekvencí tenkých membrán .....	99
V.2. Exponát v IQ Landii Liberec .....	102
SOUČASNÝ A NAVAŽUJÍCÍ VÝZKUM .....	107
LITERATURA .....	108

# ÚVOD

Tato habilitační práce navazuje na teoretický a experimentální výzkum zpracovaný v dizertační práci autorky [Kalinová, 2005], která se zabývala studiem vlivu parametrů vláknenných objemných materiálů na činitel zvukové pohltivosti a ověřovala úlohu tenké nanovláknenné vrstvy coby membránového rezonátoru ve spojení se zvuk pohlcujícím vláknenným materiálem. Z tohoto důvodu habilitační práce neopakuje výčet akustických veličin, známé teoretické rovnice a matematické vztahy, vyjma nezbytných formulací, použitých pro výpočet v rámci experimentu, resp. uvedených v jednotlivých publikacích. V návaznosti na dizertační práci, je tato habilitační práce souborem výzkumných aktivit a z nich vyplívajících poznatků jednak pro návrh a realizaci aplikovatelného akustického systému a také pro návrh a realizaci edukativních sestav pro zaujetí a aktivaci jak studentů oboru NTI/FM, tak pro případné budoucí studenty technických oborů. Principiálně nové akustické systémy, podložené udělenými patenty, nevyužívají, na rozdíl od porézních materiálů, princip závislosti činitele zvukové pohltivosti  $\alpha$  na měrném odporu  $R$  (flow resistivity [ $\text{Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ ]), ale pracují na principu rezonance, kde akustické veličiny závisí kromě strukturních parametrů membrány zejména na jejím plošném rozměru, resp. tvaru a na mechanickém napětí, resp. tuhosti membrány. Měrný odpor  $R$  má na činitel zvukové pohltivosti  $\alpha$  membrány vliv pouze při vyšších frekvencích, na rozdíl od plošné hmotnosti membrány, která ovlivňuje  $\alpha$  při nižších zvukových frekvencích [Sakagamia, 1998]. S rostoucí hodnotou měrného odporu  $R$  klesá činitel zvukové pohltivosti membrány.

Jednotlivé kapitoly se opírají o publikované příspěvky v impaktovaných časopisech, resp. uvedených v databázích SCOPUS, nebo WEB of SCIENCE, dále o udělené patenty, realizovaná díla, edukativní sestavy a exponáty.

Pro ucelený přehled pozadí výzkumu, je v úvodu zpracován jednak přehled zvukově pohltivých prvků pro aplikace v prostorové akustice, dále jsou znázorněny naměřené charakteristiky činitele zvukové pohltivosti  $\alpha$  základních zvukově pohltivých materiálů a je shrnuto nové řešení akustického prvku s optimalizovanými parametry včetně aplikačních návrhů a zdokumentovaných realizací autorky. Kapitoly následující po úvodu do problematiky, se již zabývají konkrétními parametry jednotlivých komponent nových akustických prvků. V první kapitole jsou uvedeny měřicí metody pro stanovení rezonančních vlastností nanovláknenných membrán, druhá se pak zabývá synergií dvou různých rezonančních prvků v jednom akustickém systému. V tomto uspořádání je myšlenkou spojení membránového (nanovláknenného) rezonátoru spolu s dutinovým rezonátorem, resp. perforovaným panelem. Třetí kapitola prezentuje myšlenku využití mřížky/sítěky pro ohraničení plochy kmitající nanovláknenné membrány s možností volby velikosti a tvaru kmitající plochy za účelem pohlcování zvuku o definovaném rozmezí frekvencí. Čtvrtá kapitola studuje strukturní parametry nanovláknenné membrány. Poslední pátá kapitola využívá předchozí poznatky pro návrh a ověření edukativní sestavy. Na závěr je shrnut současný a navazující výzkum.

# UVEDENÍ PROBLEMATIKY V ŠIRŠÍCH SOUVISLOSTECH

Akustické řešení prostoru vychází z měření akustického výkonu řešené místnosti a poté jsou navrženy akustické prvky s různou funkcí (absorpční obklady, absorpční podhledy, absorpční tělesa, difuzory, bariéry). Tato práce je zaměřena pouze na absorpční prvky a to zejména s důrazem na řešení nižších frekvencí zvuku. Tlumení nižších frekvencí je do jisté míry omezeno finální tloušťkou akustického materiálu. Pomocí nanovlákných rezonančních membrán bude v návrhu dosaženo vyšší akustické pohltivosti při nižších frekvencích zvuku ve srovnání s běžně dostupnými materiály.

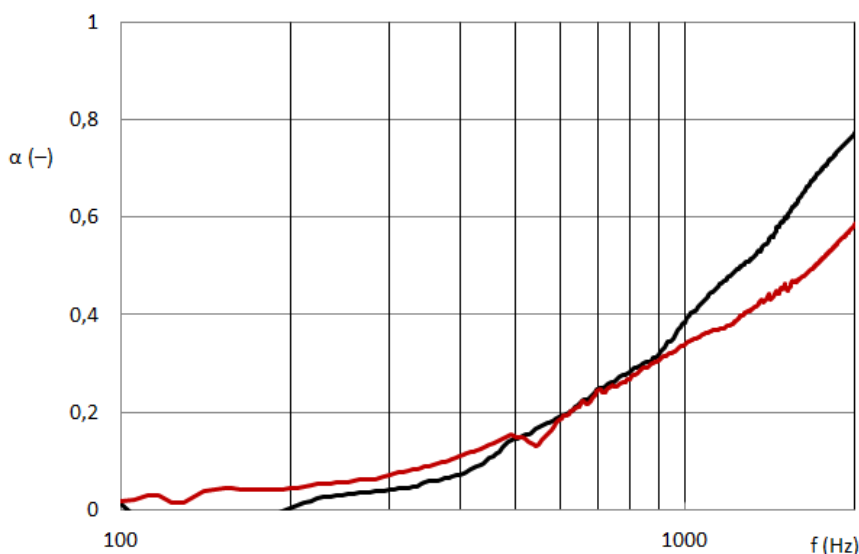
Porézní materiály jsou používány ke zmenšování amplitudy odražené zvukové vlny. Pod pojmem pohlcování zvuku rozumíme nevratnou přeměnu zvukové energie v energii jinou. Největší množství energie je spotřebováno třením kmitajících částeczek vzduchu o stěny pórů, kde v mezivrstvě dochází ke snížení rychlostního gradientu a nevratné přeměně kinetické energie částic v tepelnou. Materiály založené na rezonančním principu lze rozdělit do tří skupin; uspořádání chovající se jako kmitající membrány, uspořádání chovající se jako kmitající desky a uspořádání spočívající na principu Helmholtzových rezonátorů. Tenká kruhová membrána je v práci [Škvor, 2001] definována jako útvar, který vznikne napnutím např. tenké homogenní elastické fólie s konstantní plošnou hmotností na tuhý rám kruhového tvaru. Tímto napnutím vyvolaným radiálně působící silou membrána získá svoji tuhost. V následujících kapitolách jsou akusticky vyhodnoceny zvukově pohltivé materiály, které se v prostorové akustice obvykle používají.

## U.1. DRUHY ZVUKOVĚ POHLTIVÝCH MATERIÁLŮ

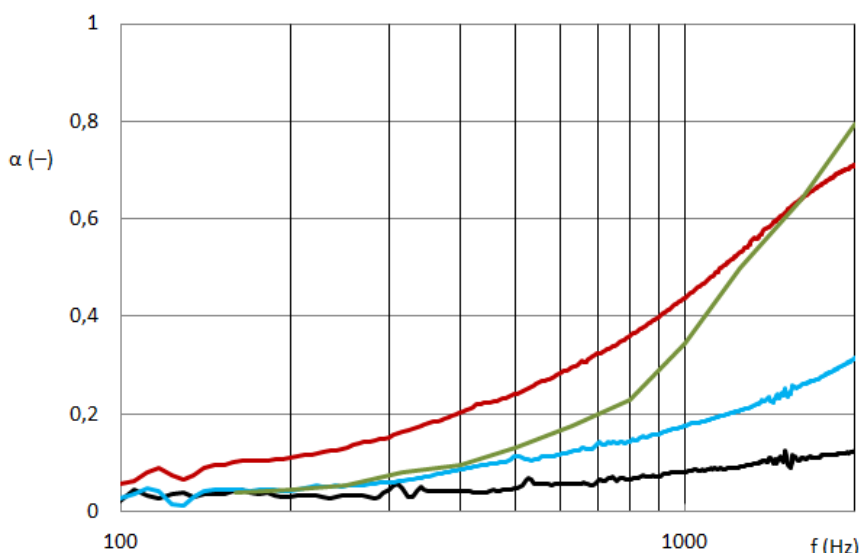
### *U.1.1. Vlákenné materiály*

Činitel zvukové pohltivosti vlákných materiálů s uspořádáním vláken kolmo na směr zvuku je vyšší než u paralelně uspořádaných materiálů. Tento jev je způsoben jednak možností pohybu jednotlivých vláken a také úbytkem akustické energie vlivem fázových přechodů mezi vlákny a vzduchem v porózním materiálu. Úseky obloučků tvarovaných vláken přispívají k celkovému směru uspořádání vláken v materiálu a akustické charakteristiky se stávají spíše izotropní. Akustická energie dopadající na úsek vlákna, který se může pohybovat, se přemění na kinetickou energii vibrujícího vlákna, tím pádem pohltivost zvuku naroste. U podélně kladených vzorků závisí nejen na možnosti úseků pohybovat se ale i na délce těchto úseků, která je regulována koncentrací pojivých vláken resp. počtem pojících bodů. Činitel zvukové pohltivosti vlákných materiálů roste s klesajícím průměrem vláken při zachování konstantní objemové hmotnosti vlákného materiálu, což je způsobeno větším měrným povrchem vláken o menší jemnosti. Tření mezi vzduchem a povrchem póru je realizováno na větší interakční ploše a je tak spotřebováno více akustické energie [Kalinová, 2005].

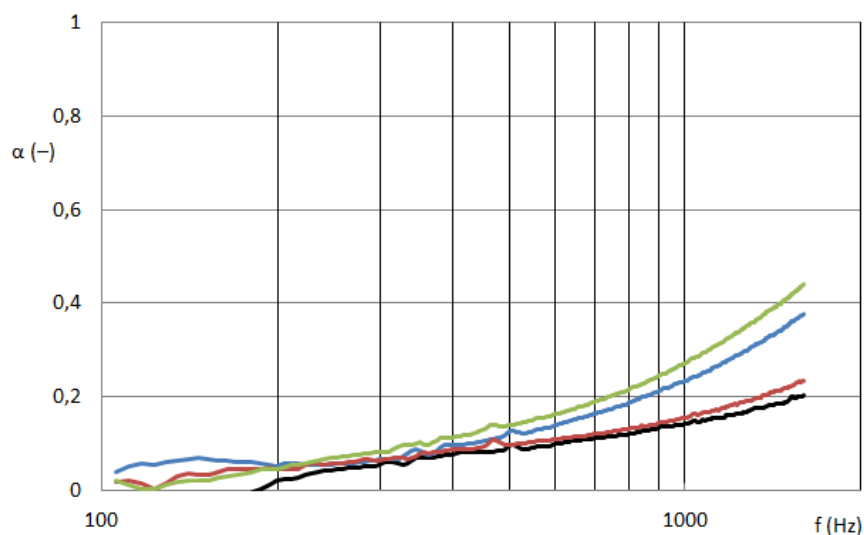
Ve stavebnictví se používají materiály ze skelných, nebo minerálních vláken (Isover, Rockwool, Alpax). Výhodou těchto struktur je jejich dobrá nehořlavost a tepelná odolnost. Nevýhodou pak zdravotní riziko při úletu částic a částí vláken, což se dá při vhodném krytování eliminovat. Další skupinou jsou materiály z organických vláken, ať už z primárních o vyšší kvalitě, nebo sekundárních (tzv. druhotných surovin), které jsou zase levnější (výrobce např.: Mitop, Juta, Jilana, Fibertex, Ekotex, Retex, Polytex, Netex, Ecotextil, Fezko Thierry, HP Pelzer, Klatex, 3M thinsulate,...). Obraz 1 znázorňuje naměřená data činitele zvukové pohltivosti vzorků ze skelných vláken o tloušťce 20mm a různé plošné hmotnosti, obraz 2 vzorků rouna z primárních vláken a obraz 3 vzorků rouna z druhotných vláken.



Obraz 1: frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti; vzorky skelných vláken vyrobené ISOVER; černá křivka = skelná vlákenná rohož o plošné hmotnosti  $600\text{g.m}^{-2}$  a tloušťce 20mm; červená křivka = skelná vlákenná rohož o plošné hmotnosti  $1300\text{g.m}^{-2}$  a tloušťce 20mm.



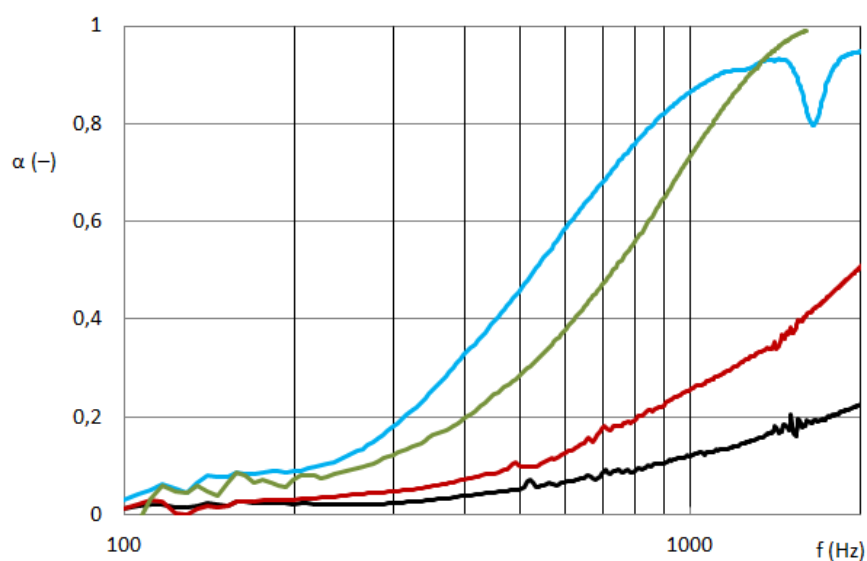
Obraz 2: frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti; graf porovnává vzorky rouna vyrobené spol. Cellofoam (F800FR HO/NK); černá křivka = rouno o tloušťce 10mm; modrá křivka = rouno o tloušťce 20mm; červená křivka = rouno o tloušťce 50mm, zelená křivka = vlákenný materiál s oboustranným krytím (Thinsulate 3M) o tloušťce 18mm a plošné hmotnosti  $315\text{gsm}$ .



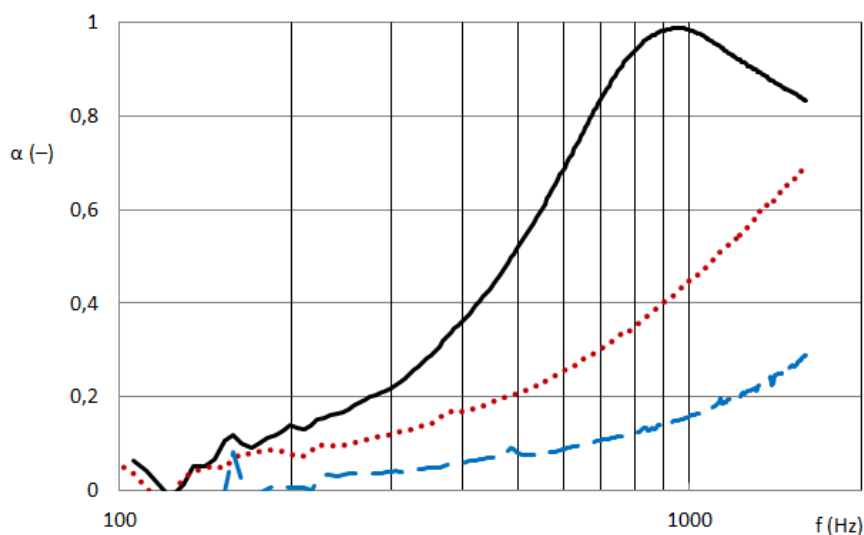
Obraz 3: frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti; vzorky rouna vyrobené JUTA a.s.; černá křivka = rouno o plošné hmotnosti  $360\text{g.m}^{-2}$  a tloušťce 18mm; modrá křivka = rouno o plošné hmotnosti  $600\text{g.m}^{-2}$  a tloušťce 18mm; červená křivka = rouno o plošné hmotnosti  $360\text{g.m}^{-2}$  a tloušťce 30mm; zelená křivka = rouno o plošné hmotnosti  $600\text{g.m}^{-2}$  a tloušťce 30mm

### U.1.2. Pěnové materiály

Pěnové struktury jsou vyráběny na základě polyuretanu, nezesíťované LDPE, nebo melaminu (výrobce např.: Celofoam, Eurofoam, BPP Brno, Pregis, Sinfo,...), nevýhodou je jejich toxicita, při uvolňování rozpouštědla polymeru. Činitel zvukové pohltivosti pěnových materiálů roste s jejich tloušťkou a objemovou hmotností (obraz 4). Pro zvýšení odrazivé, resp. pohltivé plochy, mohou být pěnové materiály tvarovány s proměnlivou tloušťkou do 3D efektu (obraz 5).



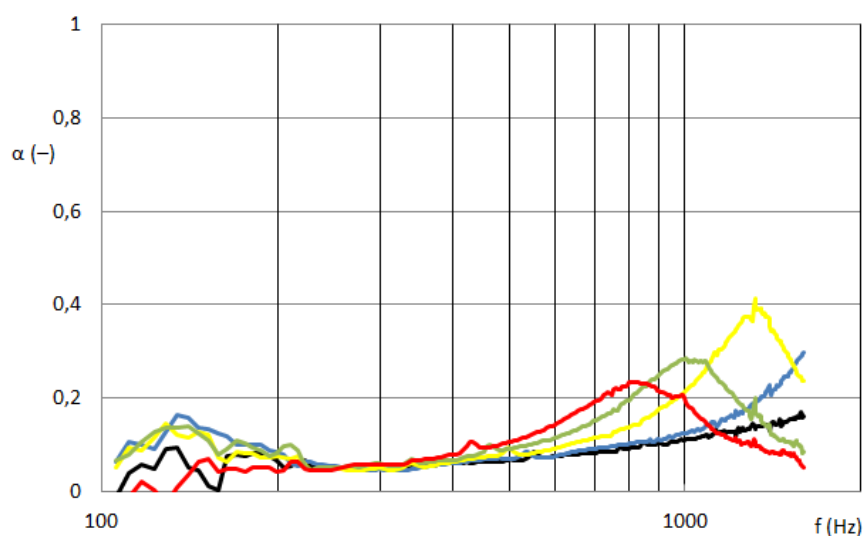
Obraz 4: frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti; graf porovnává vzorky melaminové pěny vyrobené Cellofoam HR290/O/NK; černá křivka = pěna o tloušťce 10mm; červená křivka = pěna o tloušťce 20mm; modrá křivka = pěna o tloušťce 50mm; zelená = směšová pěna o tloušťce 30mm (Akustické Materiály, s.r.o.\_Lisovaná pěna HD 3cm).



Obraz 5: frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti; KŘIVKY: modrá\_pěna s vlnkami o tloušťce 70mm, rozteč vlnek 25mm, úpatí vlnky 10mm, vrchol vlnky 25mm; červená\_pěna s jehlany o tloušťce 70mm, základna jehlanu 50x50mm, tloušťka rovinné části pěny k patě jehlanu 20mm, výška jehlanu 50 mm; černá\_pěna s obdélníky o tloušťce 60mm, šíře základny obdélníku 50mm, úpatí obdélníku 40mm, vrchol obdélníku 60mm.

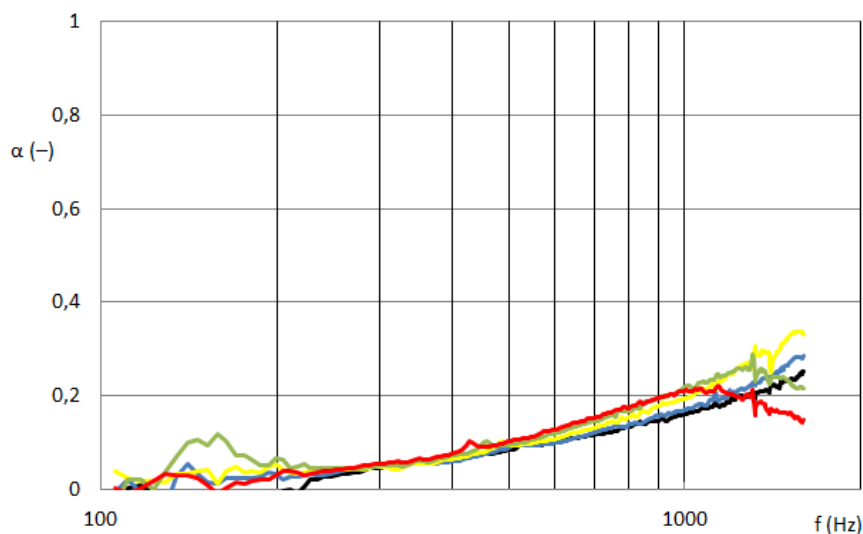
### U.1.3. Akustické perforované desky

Tuhé desky s kruhovými, čtvercovými, či šterbinovými otvory, navržené na principu Helmholtzova rezonátoru, se využívají pro pohlcování nižších frekvencí. Významné omezení těchto prvků spočívá v pohlcování velmi úzkého zvukového pásma, na které jsou tyto prvky „naladěny“. Pro ostatní frekvence je pohltivost velmi nízká (obrazy 6-9). Tyto desky jsou aplikovány buď přímo na stěnu/strop, nebo, a to většinou, v nějaké vzdálenosti od stěny/stropu, dále mohou být opatřeny výplní.

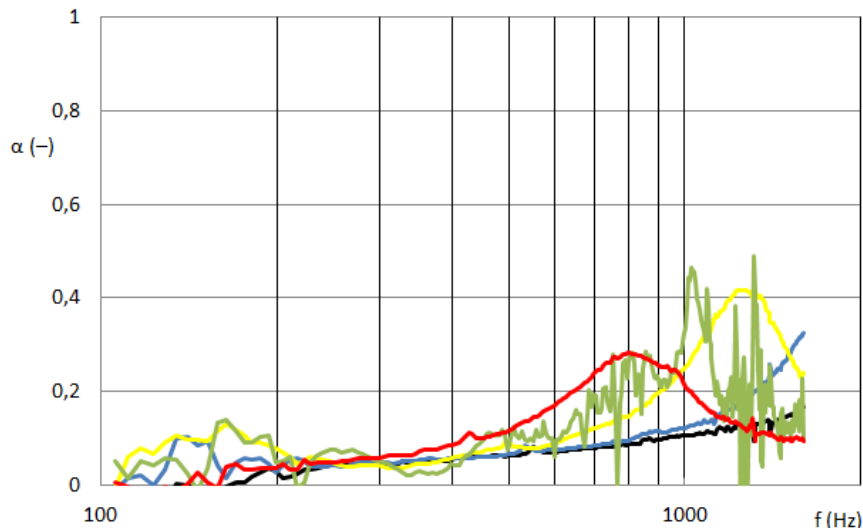


Obraz 6: frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti; tuhá deska o tloušťce 16mm z lamina s kruhovými otvory (Akustické Materiály, s.r.o.\_Akustická kazeta AVS10); Otvor o průměru 8mm s roztečí otvorů 16x16mm. Měřeno v

různé vzdálenosti od stěny (vzduchová mezera včetně tloušťky vzorku 0 - 50 mm): černá křivka = 0; modrá křivka = 20; žlutá křivka = 30; zelená křivka = 40; červená křivka = 50.

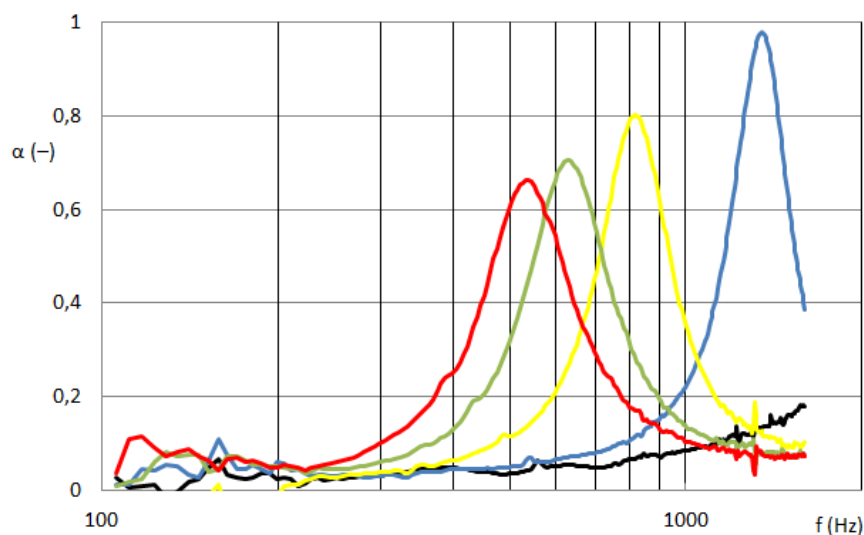


Obraz 7: frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti; tuhá deska o tloušťce 16mm z lamina s kruhovými otvory a štěrbinami (Akustické Materiály, s.r.o. Akustická kazeta AVS3); otvor o průměru 8mm s roztečí otvorů 16x16mm, přes to štěrbina o tloušťce 4mm, šířce 5mm a rozteči 8mm. Měřeno v různé vzdálenosti od stěny (vzduchová mezera včetně tloušťky vzorku 0 - 50 mm): černá křivka = 0; modrá křivka = 20; žlutá křivka = 30; zelená křivka = 40; červená křivka = 50.



Obraz 8: frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti; tuhá deska o tloušťce 16mm z lamina s kruhovými otvory a štěrbinami (Akustické Materiály, s.r.o. Akustická kazeta AVS2); otvor o průměru 8mm s roztečí otvorů 16x16mm, přes to štěrbina o tloušťce 4mm, šířce 13mm a rozteči 16mm. Měřeno v různé vzdálenosti od stěny (vzduchová mezera včetně tloušťky vzorku 0 - 50 mm): černá křivka = 0; modrá křivka = 20; žlutá křivka = 30; zelená křivka = 40; červená křivka = 50.

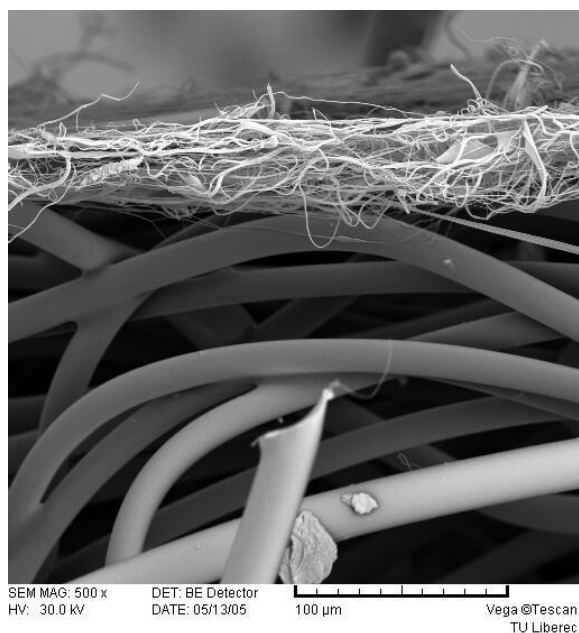




Obraz 9: frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti; tuhá deska o tloušťce 16mm z lamina s kruhovými otvory a štěrbinami (Akustické Materiály, s.r.o. **Akustická kazeta AVS1**); otvor o průměru 8mm s roztečí otvorů 16x16mm, přes to štěrbina o tloušťce 4mm, šířce 29mm a rozteči 32mm. Měřeno v různé vzdálenosti od stěny (vzduchová mezera včetně tloušťky vzorku 0 - 50 mm): černá křivka = 0; modrá křivka = 20; žlutá křivka = 30; zelená křivka = 40; červená křivka = 50.

#### U.1.4. Akustické nanovláknenné membrány

Zvukově pohltivé materiály s nanovláknennými vrstvami byly vyvinuty na TUL. Nanovláknenná vrstva pracuje jako rezonanční membrána, která při působení zvuku vibruje a pohlcuje nižší rezonanční frekvence zvuku. Nanovláknenné vrstvy jsou vyrobeny elektrostatickým zvlákňováním roztoku nebo taveniny polymeru na vláknennou netkanou textilií. Výrobu nanovláknenných vrstev elektrostatickým zvlákňováním popisují patenty [Kim, 2005; Jirsák, 2006].



Obr. 10 Snímek nanovláknenné struktury v porovnání s vláknennou strukturou.

Unikátní akustické vlastnosti nanovlákných vrstev jsou dány jednak velkým specifickým povrchem nanovláken, kde může docházet k viskózním ztrátám a také schopností nanovlákné vrstvy rezonovat na vlastní frekvenci. Snímek na obraze 10 ukazuje rozdílnou strukturu nanovlákné vrstvy na vlákněm materiálu. Dopadne-li na nanovláknou membránu zvukové vlnění, uvede ji do vynucených kmitů, jejichž amplituda je maximální v případě rezonance.

Vývoj zvukově pohltivého materiálu s použitým rezonančním prvkem byl práci [Kalinová, 2005] založen na výzkumu jednotlivých komponent materiálu, tedy výzkumu parametrů zásadních pro velikost činitele zvukové pohltivosti. Výsledky vlivů jednotlivých parametrů jak samotného porózního materiálu, tak samotného rezonančního prvku a konečně materiálu kombinujícího oba prvky na zvukovou pohltivost byly v této dizertační práci shrnuty [Kalinová, 2005]. Nanovlákná vrstva aplikovaná na podkladovou netkanou textilií vykazuje rezonanční efekt. Maximální hodnota činitele zvukové pohltivosti je oproti samotné podkladové textilií posunuta k nižším frekvencím, které jsou z hlediska absorpce zvuku žádoucí. S počtem rezonančních prvků roste činitel zvukové pohltivosti. Jelikož zůstává plošná hmotnost a s tím i související tuhost membrány konstantní, prvky vykazují amplitudu pro určitý mód při stejné frekvenci. S plošnou hmotností nanovlákné vrstvy se maxima činitele zvukové pohltivosti posouvají ve směru požadovaných nižších frekvencí. S plošnou hmotností výplňkového vlákněho materiálu se zlepšuje zatlumení rezonančního systému, což se projevuje menším poklesem činitele zvukové pohltivosti v oblasti antirezonance. Jak s tloušťkou, tak s objemovou hmotností materiálu, rezonanční frekvence klesá k požadovaným nižším hodnotám a činitel zvukové pohltivosti roste. Rezonátory sestavené se sestupnou tendencí plošných hmotností ve směru šíření zvuku vykazují jednak vyšší pohltivost a také nižší rezonanční frekvenci systému oproti seskupení rezonátorů s vzestupnou tendencí plošných hmotností. Čím dále jsou následné rezonátory od prvního nárazového rezonátoru, tím více utlumená zvuková vlna na ně dopadá, rozkmit rezonátoru je stále menší a s tím spojená účinnost zvukového pohlcení. To je důvod, proč rezonanční systém, který má zařazen prvek pracující na nejnižší frekvenci jako poslední je v nižších frekvencích méně účinný než rezonanční systém s prvkem pracujícím na nejnižší frekvenci zařazeným jako první. Materiál, který je výsledkem výzkumu vlákných charakteristik, umožňuje vysokou zvukovou pohltivost v široké frekvenční škále. Je to způsobeno použitím rezonanční nanovlákné membrány, která je tlumena pohltivou vlákněnou vrstvou. Především pohlcování zvuku o nižších frekvencích je velkým problémem, který tento materiál řeší na velmi dobré úrovni [Kalinová, 2005].

## U.2. NÁVRH AKUSTICKÉHO PRVKU

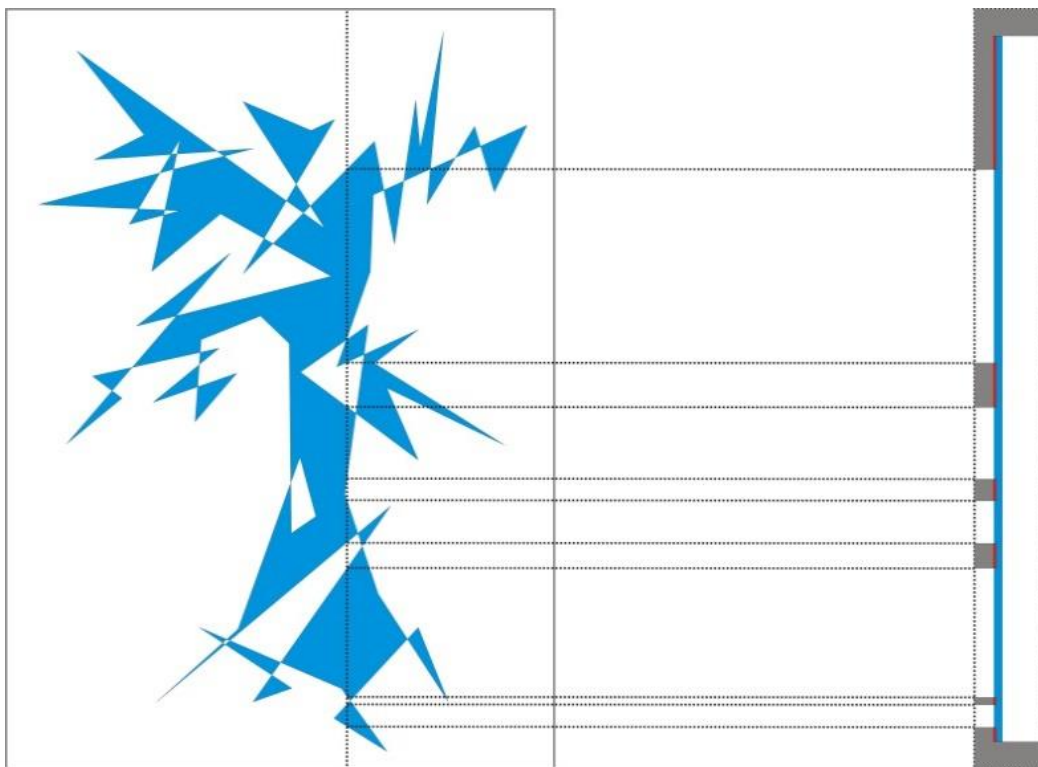
Předmětem výzkumu je v této habilitační práci návrh, ověření a optimalizace zvukově pohltivých akustických systémů s rezonanční nanovláknou membránou. Akustický prvek je založen na pevném rámu v podobě perforované desky či flexibilním rámu v podobě lineárních útvarů či mřížky, jejichž zadní stranu pokrývá tenká nosná vrstva s nanovláknou membránou, která je těmito rámy do jisté míry kryta proti mechanickému poškození. Rám má dále pohledovou funkci. Na obraze 11 je znázorněno první uspořádání prvku, založeného na perforovaném panelu s nanovláknou vrstvou, kde plocha nanovlákné membrány je dána velikostí a tvarem perforace, která se, v obecném případě, nemusí svým tvarem a velikostí opakovat v celé ploše a prvek tak sestává z mnoha různých plošek, které umožňují kmitání membrány s výsledkem jedinečných vlastností každé kmitající plochy. Do systému vstupují také vlastnosti dutinového rezonátoru (vztah 1), kde kromě velikosti, a rozteči otvoru, je podstatná také tloušťka desky a její vzdálenost od odrazivé plochy (v aplikaci stěny/stropu).

Frekvence perforovaného panelu  $f_H$  [Hz], založeného na principu Helmholtzova rezonátoru, je dle prací [Kolmer, 1980; Randeberg, 2000] dána výrazem

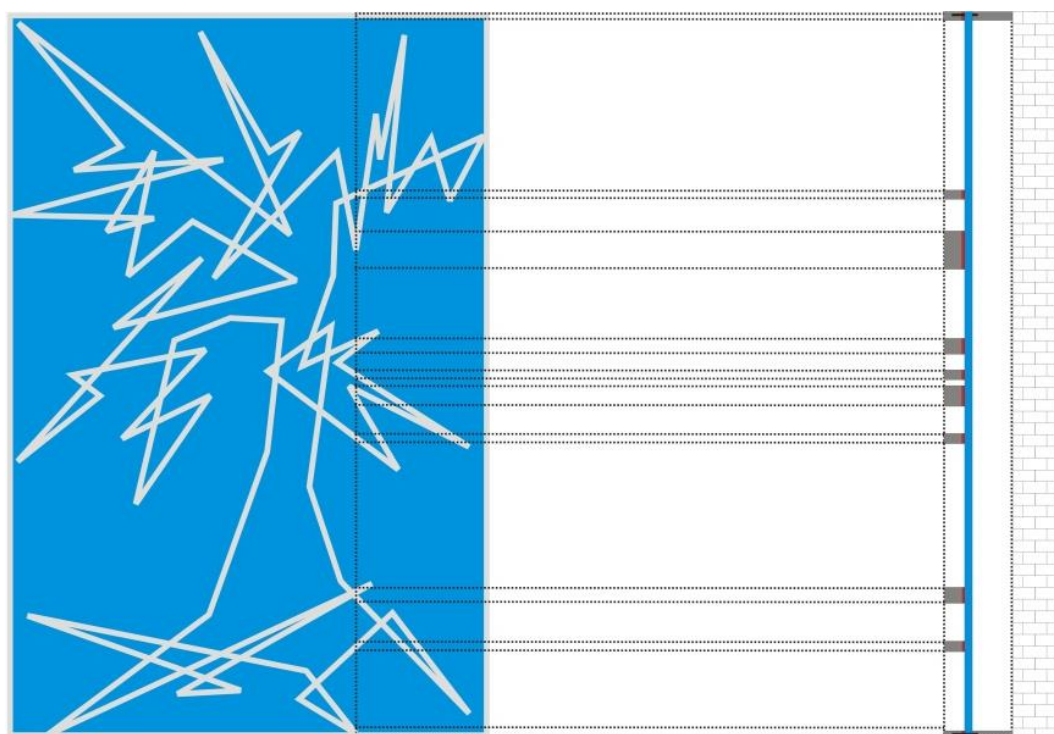
$$f_H = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_D}{S_R l d}}, \quad (1)$$

kde  $c$  je rychlost šíření zvuku prostředím [ $\text{m.s}^{-1}$ ],  $S_D$  je plocha průřezu dutiny [ $\text{m}^2$ ],  $S_R$  je plocha rezonátoru (rozteč otvorů) [ $\text{m}^2$ ],  $l$  je tloušťka perforované desky [ $\text{m}$ ] a  $d$  je vzdálenost od stěny [ $\text{m}$ ].

Podobně obraz 12 znázorňuje další uspořádání prvku, založeného na rámu v podobě lineárních útvarů (drátěná konstrukce), kterou v celé jeho ploše na zadní straně překrývá nanovlákná membrána. Každý tvar rámu ohraničuje plochu kmitající membrány a v obecném případě, se jednotlivý útvar rámu nemusí opakovat v celé ploše a prvek tak sestává z mnoha různých ohraničení, které umožňují kmitání membrány s výsledkem jedinečných vlastností každé kmitající plochy.



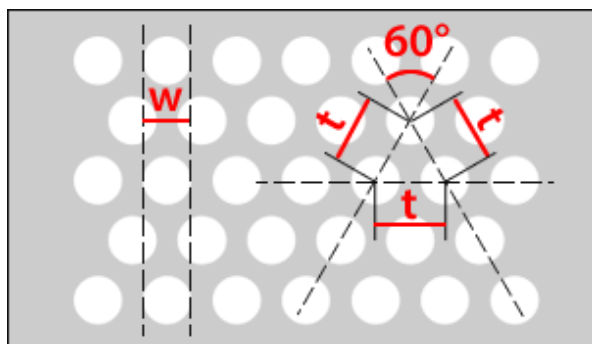
Obraz 11: Princip návrhu finálního řešení akustického prvku založeného na perforovaném panelu s nanovláknennou vrstvou v pohledu a řezu. Šedá barva v řezu znázorňuje neperforovanou část panelu (desky), bílá perforaci panelu, modrá nanovláknennou rezonanční membránu a červená adhesivní prostředek.



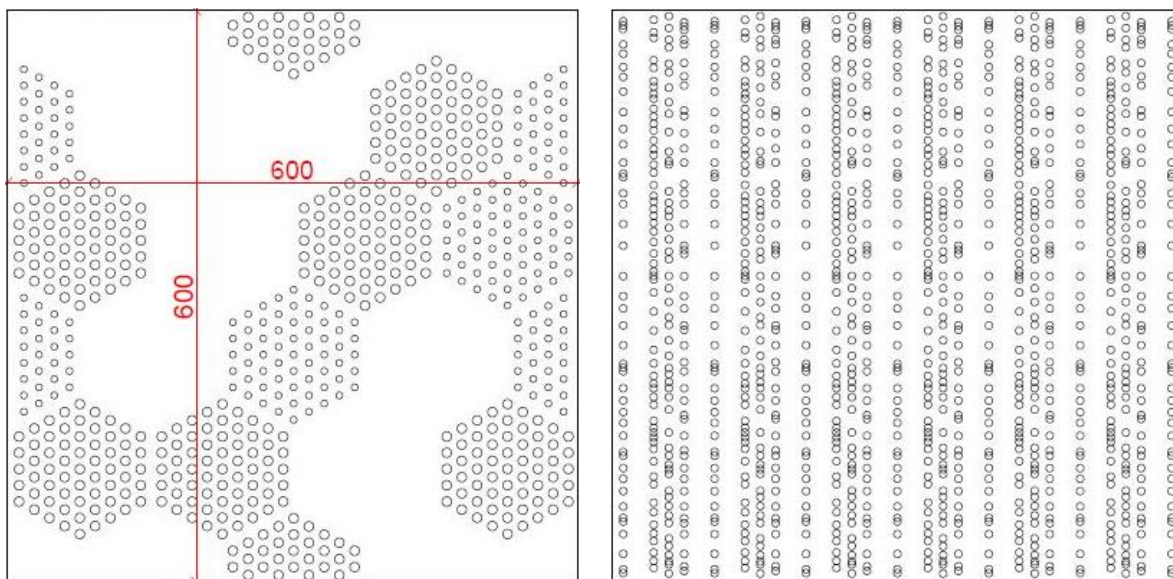
Obraz 12: Princip návrhu finálního řešení akustického prvku založeného na rámu v podobě lineárních útvarů s nanovláknennou vrstvou v pohledu a řezu. Šedá barva v řezu znázorňuje rám (drátěná konstrukce), modrá nanovláknennou rezonanční membránu a červená adhesivní prostředek.

### U.2.1. Aluminiové perforované panely s nanovláknennou vrstvou

Jedním z řešení obecného prvku, založeného na perforovaném panelu s nanovláknennou vrstvou, je pravidelná perforace s danou velikostí a tvarem otvorů a jejich roztečí. Základem návrhu je komponenta z hliníkového plechu o tloušťce 1mm a kruhovými perforacemi volitelných průměrů a roztečí dle obrazu 13. Po optimalizaci parametrů perforací vzhledem k činiteli zvukové pohltivosti finálního akustického prvku s nanovláknennou membránou o daných parametrech, bylo navrženo 9 variant perforací tak, aby výsledné perforace vytvářely designový vzor a také aby velikosti a rozteče perforací, coby definic ploch pro kmitání nanovláknenné membrány, odpovídaly předchozím výsledkům pro nejvyšší hodnoty činitele zvukové pohltivosti (obraz 14).



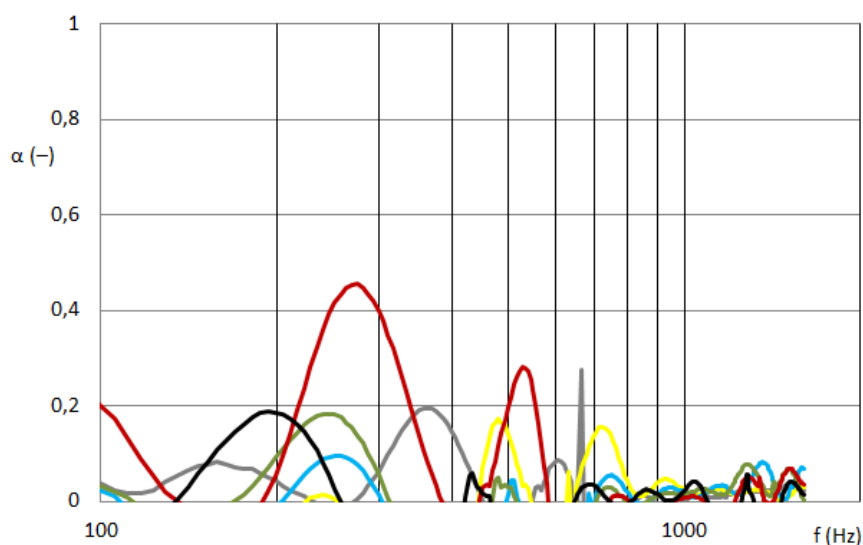
Obraz 13: Komponenta využitá pro návrh akustických prvků, založených na perforovaném panelu s nanovláknennou vrstvou.



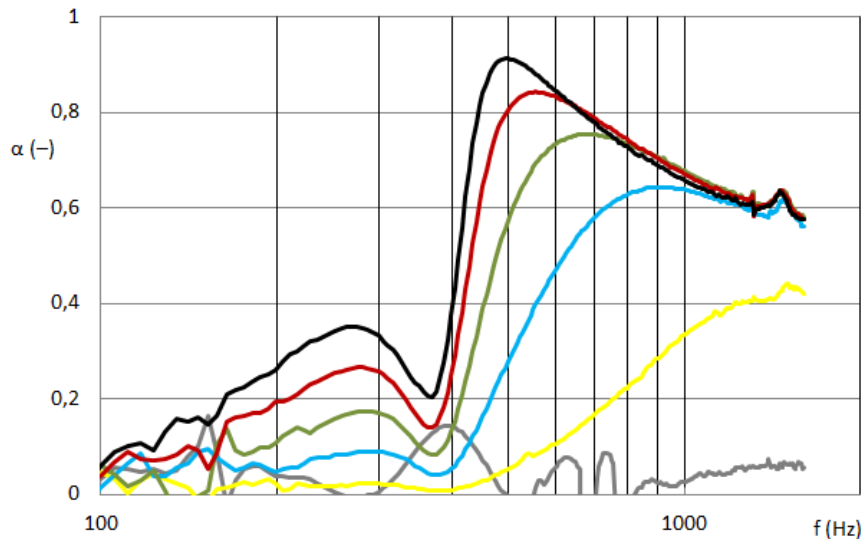
Obraz 14: Dva z návrhů perforací s designovým charakterem založených na kruhových otvorech různých velikostí a roztečí v rámci jednoho akustického prvku.

Obrazy 15-18 znázorňují zvukově pohltivé vlastnosti navržených prvků, kdy k pohledové perforované desce jsou postupně přidávány další komponenty. Akustický prvek je vždy měřen v různé vzdálenosti od stěny (5 – 50mm). Obraz 15 znázorňuje samotnou perforovanou desku, obraz 16 perforovanou desku s nanovláknennou

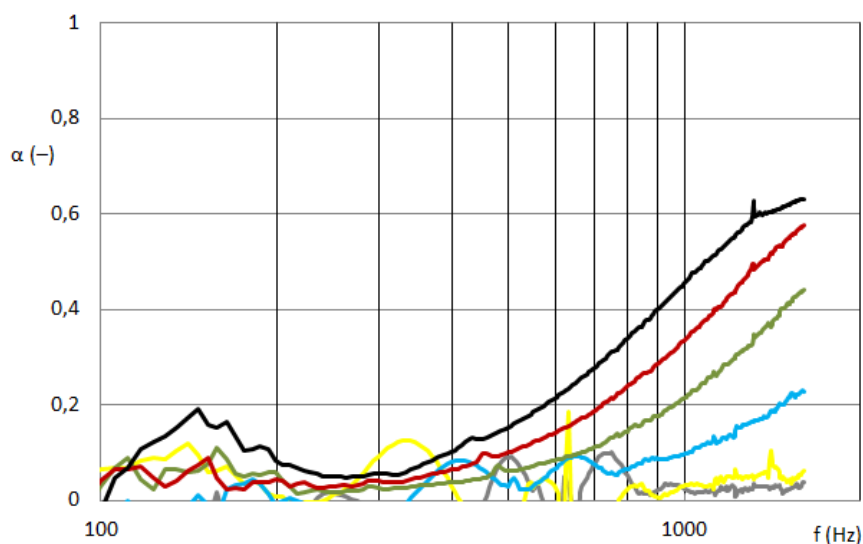
vrstvou na tenkém nosiči a pro potvrzení unikátních akustických vlastností prvku s nanovrstvou, pak obraz 17 znázorňuje perforovanou desku s nosičem pro nano, ale bez nanovláknenné vrstvy. Obraz 18 pak souhrnně porovnává všechny varianty ve vzdálenosti 50mm od stěny.



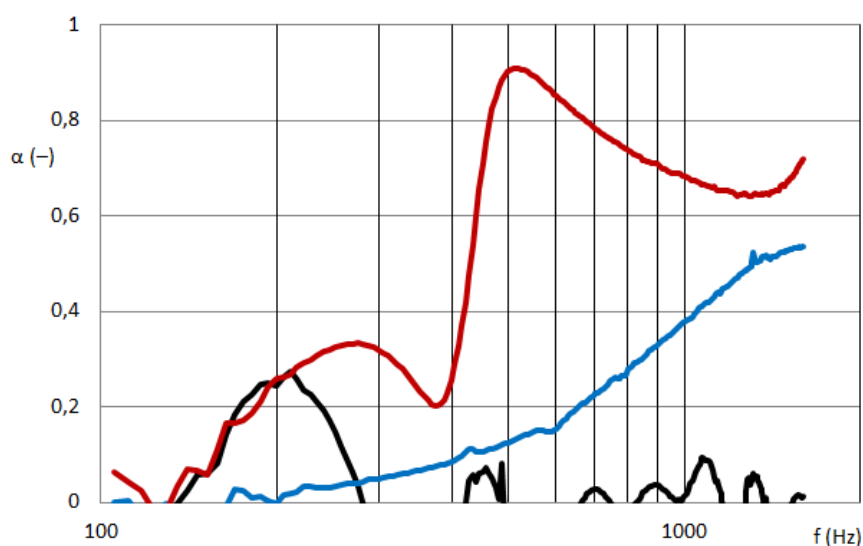
Obraz 15: frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti; Al děrovaný plech o tloušťce 1mm s vystředěnými kruhovými otvory o průměru 8 mm, s roztečí otvorů 10 mm, bez nano; KŘIVKY: šedá 5mm, žlutá 10mm, modrá 20mm, zelená 30mm, červená 40mm, černá 50mm.



Obraz 16: frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti; Al děrovaný plech o tloušťce 1mm s vystředěnými kruhovými otvory o průměru 8 mm, s roztečí otvorů 10 mm s nanovláknennou vrstvou (N) na nosiči (E). KŘIVKY: šedá 5mm, žlutá 10mm, modrá 20mm, zelená 30mm, červená 40mm, černá 50mm.



*Obraz 17: frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti; Al děrovaný plech o tloušťce 1mm s vystředěnými kruhovými otvory o průměru 8 mm, s roztečí otvorů 10 mm, bez nano, s nosičem pro nanovrstvu (E). KŘIVKY: šedá 5mm, žlutá 10mm, modrá 20mm, zelená 30mm, červená 40mm, černá 50mm.*



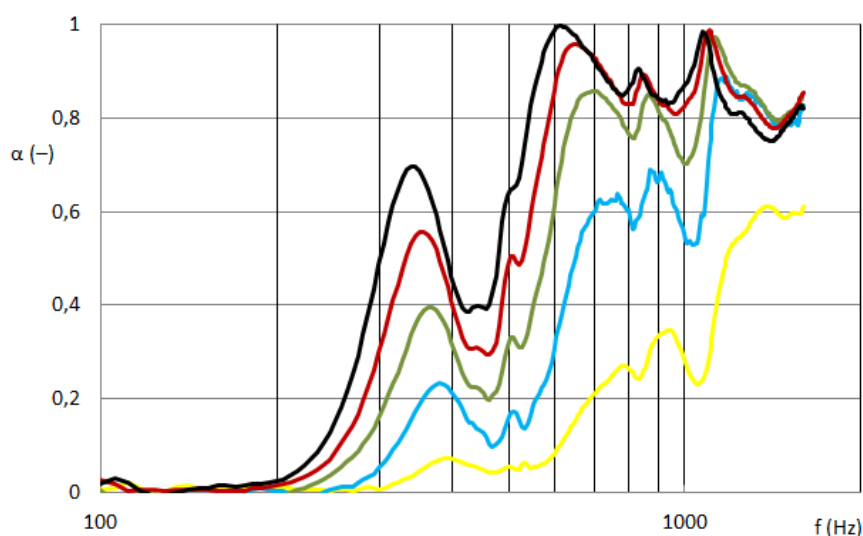
*Obraz 18: frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti; Al děrovaný plech o tloušťce 1mm s vystředěnými čtvercovými otvory (C) o rozměru 10 mm, s roztečí otvorů 12 mm (/12), s nosičem pro nanovrstvu (E), nebo s nanovrstvou (N) na nosiči (E). KŘIVKY: černá - Al perforovaná deska ve vzdálenosti 50mm od stěny, modrá - Al perforovaná deska s nosičem pro nanovrstvu (E) ve vzdálenosti 50mm od stěny, červená - Al perforovaná deska s nanovrstvou (N) na nosiči (E) ve vzdálenosti 50mm od stěny.*

### **U.2.2. Skelné mřížky s nanovláknennou vrstvou**

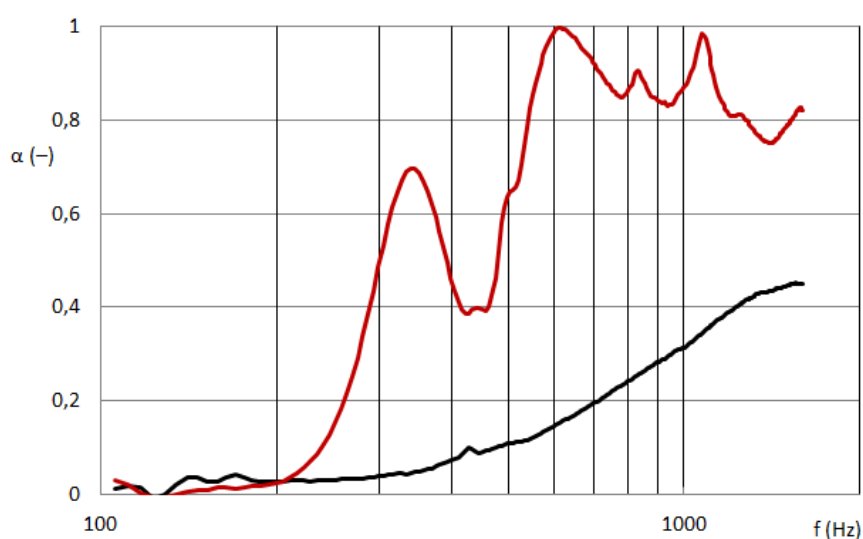
Akustický prvek je v tomto případě založen na rámu - v podobě pravidelné mřížky ze skelných pásků zanedbatelné tloušťky - jehož zadní stranu pokrývá tenká nosná vrstva s nanovláknennou membránou. Návrh vychází z řešení obecného prvku, založeného na rámu v podobě lineárních útvarů s nanovláknennou vrstvou (obraz 12), zde mřížka zajišťuje pravidelné volné plochy s danou velikostí a tvarem otvorů a jejich roztečí.



Obraz 19 znázorňuje pohltivost  $\alpha$  akustického prvku v podobě mřížky s nanovláknennou vrstvou na tenkém nosiči, který je měřen v různé vzdálenosti od stěny (10 – 50mm). Obraz 20 porovnává zvukově pohltivé vlastnosti akustického prvku s a bez nanovláknenné membrány. Navržený prvek je na závěr porovnáván s běžně používaným pohltivým materiálem s dosaženými nejlepšími výsledky zvukové pohltivosti, které byly naměřeny (obraz 21). Z tohoto porovnání, je zřejmé, že vyvinutý akustický prvek může konkurovat materiálu běžně dostupnému na trhu, který dosahuje nejlepších výsledků (obraz 5) a to i při nižší skladebné tloušťce prvku (počítáno i s případnou vzduchovou mezerou). Porovnávané skladebné tloušťky jsou 30, 40 a 50mm ku 60mm pěnovému materiálu. Benefitem navržené technologie je získaný prostor mezi akustickým prvkem tloušťky 1-5mm a stěnou/stropem, který může být využit pro instalaci osvětlení, reproduktorů apod.

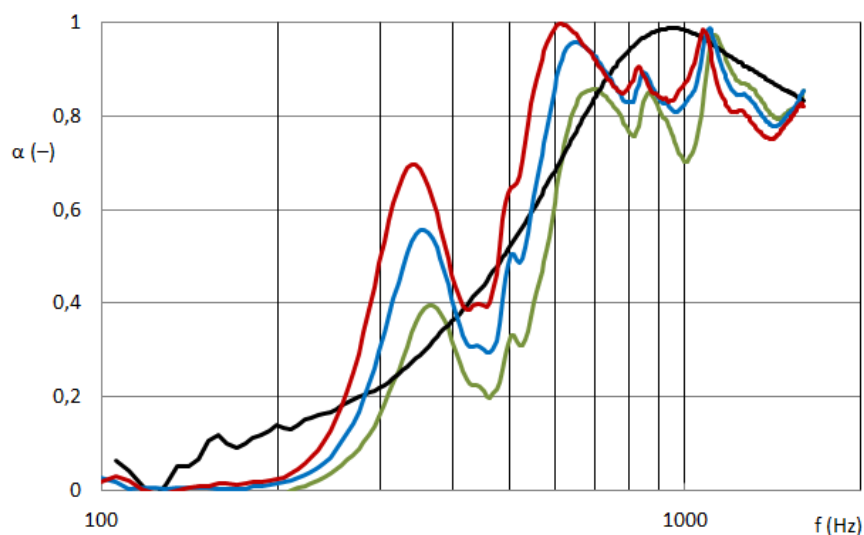


Obraz 19: frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti; Nanovrstva na nosiči (E) laminována na mřížku, uložené v různé vzdálenosti od stěny (10 – 50 mm); KŘIVKY: žlutá 10, modrá 20, zelená 30, červená 40, černá 50.



Obraz 20: frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti; Nanovrstva na nosiči (E) laminována na mřížku; KŘIVKY: červená - mřížka s nanovrstvou (NA) na nosiči (E), ve vzdálenosti 50mm od stěny, černá - mřížka s nosičem bez nanovláknenné vrstvy (E) vzdálenosti 50mm od stěny.

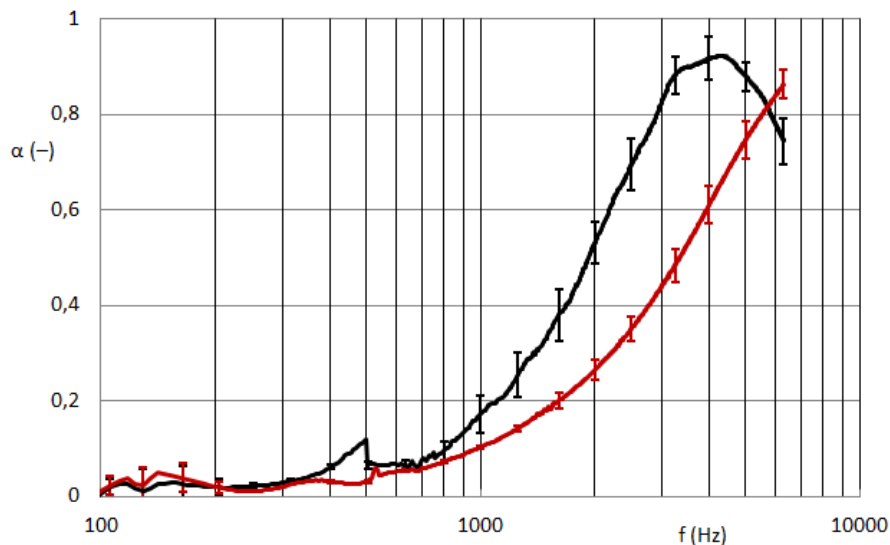




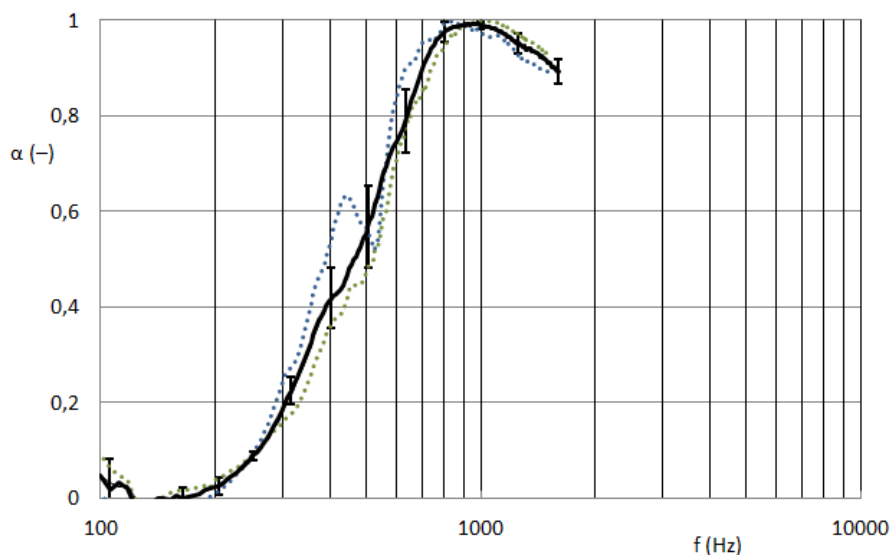
Obraz 21: frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti; Nanovrstva na nosiči (E) laminována na mřížku o tloušťce 1mm a různé vzdálenosti od stěny v porovnání s akustickou pěnou o tloušťce 60mm; KŘIVKY: červená - mřížka s nanovrstvou (NA) na nosiči (E) o tloušťce 1mm, ve vzdálenosti 50mm od stěny, modrá - mřížka s nanovrstvou (NA) na nosiči (E) o tloušťce 1mm, ve vzdálenosti 40mm od stěny, zelená - mřížka s nanovrstvou (NA) na nosiči (E) o tloušťce 1mm, ve vzdálenosti 30mm od stěny, černá – akustická pěna o celkové tloušťce 60mm (pěna s obdélníky o tloušťce 60mm, šíře základny obdélníku 50mm, úpatí obdélníku 40mm, vrchol obdélníku 60mm).

### U.3. STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ DAT

Ve většině naměřených experimentálních dat byla vypočítána průměrná hodnota a směrodatná odchylka činitele zvukové pohltivosti pro každou frekvenci z pěti až deseti měření. V rámci grafů, kde se porovnávají křivky činitele zvukové pohltivosti materiálů, nejsou vynášeny směrodatné odchylky pro zajištění přehlednosti a zobrazitelnosti výsledků. Směrodatné odchylky navíc nelze kvůli přehlednosti znázornit pro každou z 1064 hodnot frekvencí zvuku, ale jsou vyneseny jen ty v třetinooktávách. Následující obrazy znázorňují směrodatné odchylky pro tři typické druhy akustických materiálů, které jsou v této práci hodnoceny (rouno, rouno s nanovláknennou vrstvou a mřížka s nanovláknennou membránou). První materiál je typické vlákenné rouno z druhotných surovin a podílem bikomponentních vláken o celkové plošné hmotnosti  $600 \text{ g.m}^{-2}$  a tloušťce  $10 \text{ mm} \pm 1,5 \text{ mm}$  (obraz 22). Druhý je pro porovnání ten samý materiál rouna z druhotných surovin s laminovanou nanovláknennou vrstvou na povrchu. Z porovnání obou, (obraz 22) je zřejmé, že nehomogenita materiálu se přidáním nanovláknenné vrstvy dramaticky nezmění. Třetí případ (na obraze 23) znázorňuje nanovláknennou vrstvu o plošné hmotnosti  $0,2 \text{ g.m}^{-2}$  na tenkém nosiči laminovanou na skelnou mřížku o tloušťce  $1 \text{ mm}$  a velikosti oka  $5,3 \times 5,2 \text{ mm}$ , resp.  $4,5 \times 4 \text{ mm}$  otvoru. Nehomogenita tohoto prvku je ve frekvenčním pásmu  $400\text{--}700 \text{ Hz}$  větší než nehomogenita vlákenného rouna, na druhou stranu od frekvence  $700 \text{ Hz}$  a více je nehomogenita naopak menší. Velká směrodatná odchylka ve frekvenčním pásmu  $400\text{--}700 \text{ Hz}$  je způsobená zakmitáním membrány v mřížce, jak ukazují znázorněné tečkované křivky pro dva naměřené vzorky stejného materiálu.



Obraz 22: frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti; KŘIVKY: červená - rouno o plošné hmotnosti  $600 \text{ g.m}^{-2}$  a tloušťce  $10 \text{ mm} \pm 1,5 \text{ mm}$ ; černá - nanovrstva plošné hmotnosti  $0,2 \text{ g.m}^{-2}$  na tenkém nosiči laminována na rouno o plošné hmotnosti  $600 \text{ g.m}^{-2}$  a tloušťce  $10 \text{ mm} \pm 1,5 \text{ mm}$ .

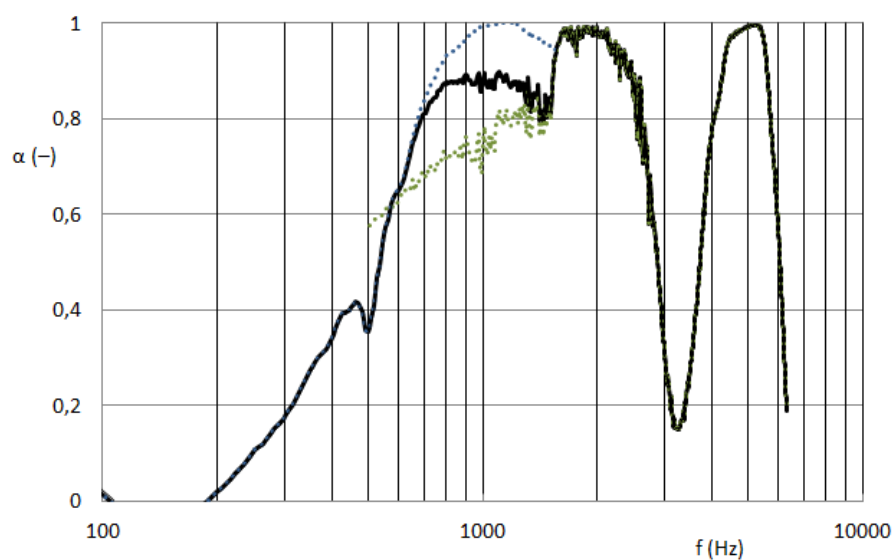


Obraz 23: frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti; Nanovrstva plošné hmotnosti  $0,2 \text{ g.m}^{-2}$  na tenkém nosiči laminována na mřížku o tloušťce  $1 \text{ mm}$  a velikosti oka  $5,3 \times 5,2 \text{ mm}$ , resp.  $4,5 \times 4 \text{ mm}$  otvoru; měřeno ve vzdálenosti  $50 \text{ mm}$  od stěny. Tečkované křivky patří dvěma různým vzorkům stejného materiálu s extrémními daty v oblasti cca  $450 \text{ Hz}$ .

Jak bude popsáno v kapitole I.1. dále, měření činitele zvukové pohltivosti v impedanční trubici zahrnuje kombinaci velkého průměru trubice ( $100 \text{ mm}$ ) pro frekvenční rozsah  $100 - 1600 \text{ Hz}$  a malého průměru trubice ( $29 \text{ mm}$ ) pro frekvenční rozsah  $500 - 6400 \text{ Hz}$ . Typickým případem pro nesourodá data z obou trubic, kdy vzorek vykazuje rezonanční chování, které je ovlivněno okrajovými podmínkami plochy vzorku, je nanovláknenná membrána na mřížce o velikosti oka  $5,3 \times 5,2 \text{ mm}$ , resp.  $4,5 \times 4 \text{ mm}$  otvoru (obraz 24). V případě homogenního materiálu, by křivky z obou průměrů trubic na sebe plynule navazovaly, kdežto v případě rezonanční membrány, se chová kruhový vzorek stejného materiálu o různém průměru/ploše jinak (zelená a modrá tečkovaná křivka nenasazuje jedna na druhou). Z tohoto důvodu byla většina vzorků hodnocena a znázorněna pouze ve frekvenčním spektru  $100 - 1600 \text{ Hz}$  (data z velké trubice o průměru  $100 \text{ mm}$ ).

Dále, pokud byla hodnocena nanovláknenná membrána ve vztahu k umístění v měřicí aparatuře, kde se typicky hodnotí vliv změny vzdálenosti membrány od odrazivé stěny, pak byl do aparatury umístěn pouze jeden vzorek a graficky znázorněn pouze tento, tzn. nebyl brán průměr z více naměřených vzorků.

Pro stanovení průměrného průměru nanovláken, byla struktura nasnímana nejméně na pěti místech nanovláknenné vrstvy, naměřeno nejméně 100 průměrů vláken a vypočítána průměrná hodnota a směrodatná odchylka. V případech, kdy byl hodnocen vliv struktury nanovláken na akustické vlastnosti rezonančního systému, byla vyhodnocena četnost průměrů vláken se znázorněním minima, maxima, mediánu a kvartilů.



Obraz 24: frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti; Nanovrstva plošné hmotnosti  $0,2 \text{ g.m}^{-2}$  na tenkém nosiči laminována na mřížku o tloušťce  $1 \text{ mm}$  a velikosti oka  $5,3 \times 5,2 \text{ mm}$ , resp.  $4,5 \times 4 \text{ mm}$  otvoru; měřeno ve vzdálenosti  $50 \text{ mm}$  od stěny; KŘIVKY: modrá tečkovaná - data naměřená na velké trubici v rozsahu  $100 - 1600 \text{ Hz}$ ; zelená tečkovaná - data naměřená na malé trubici v rozsahu  $500 - 6400 \text{ Hz}$ ; černá – křivka kombinovaná z měření na obou trubicích.

#### U.4. NAVRHOVANÉ APLIKACE

Akustické prvky, navrženy v kapitole U.2., jsou založeny na světlo propustné nanovláknenné membráně, mohou být proto využity pro řešení prostorové akustiky v podobě světelného podhledu, obkladu, světelného objektu (2D, 3D), polopříčky, kuchyňských dvířek, japonské zástěny a žaluzie, aj. Některé z navrhovaných aplikací jsou znázorněny na obraze 25.



*Obraz 25: návrhy akustických prvků pro aplikace v prostorové akustice.*

## U.5. REALIZOVANÉ AKUSTICKÉ PRVKY

Vzhledem k tomu, že pro efektivní aplikaci musí akustický panel vykazovat dostatečnou zvukovou pohltivost, mechanickou odolnost a inovativní design, jde o kompromisní řešení těchto tří aspektů. Technologie nanovlákněné membrány navíc výrazně definuje limity estetického provedení samotného výrobku. Jedná se o tvar a rozložení perforace desky, kde:

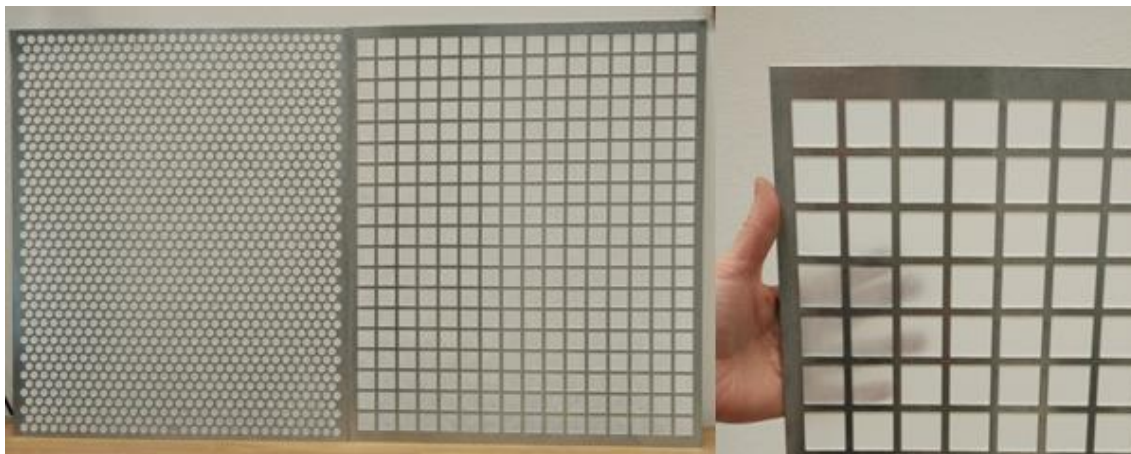
optimální otvory pro čtvercovou perforaci jsou:

- čtvercový otvor o straně 9 mm, rozteč jednotlivých otvorů 11 mm
- čtvercový otvor o straně 10 mm, rozteč jednotlivých otvorů 12 mm

optimální otvory pro kruhovou perforaci:

- kruhový otvor o průměru 8 mm, rozteč jednotlivých otvorů 10 mm
- kruhový otvor o průměru 4 mm, rozteč jednotlivých otvorů 5 mm

Pro dosažení patřičného designového efektu a také s ohledem na uvažované prosvícení, je finální provedení lícové plochy panelu kombinací perforovaných a neperforovaných ploch (obraz 26). Vzhledem k aplikačnímu účelu akustického panelu a k limitům, které jsou definovány výslednými vlastnostmi obkladového panelu, bylo nutno zhodnotit co možná nejširší škálu dostupných materiálů. Jelikož se obklad profiluje jako akusticky pohltivý, vychází celý koncept návrhu ze snahy nastavit rovnováhu mezi akustickými účinky nanovlákněné membrány v perforaci panelu a designového provedení obkladového segmentu.



*Obraz 26: realizace akustických prvků pro aplikace v prostorové akustice. Perforovaná hliníková deska o tloušťce 1mm v podobě světelných podhledů 600x500.*

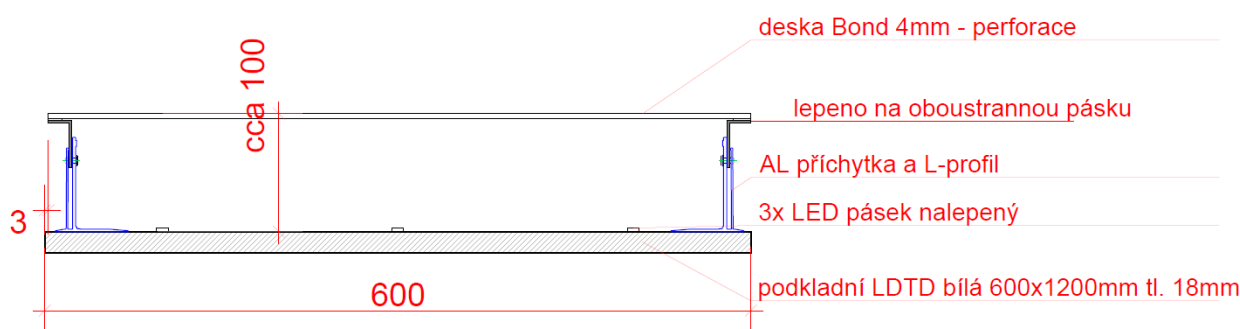
Jako technicky akceptovatelné varianty byly dále posuzovány tyto:

- Deskový materiál na bázi dřeva (MDF, DTD, překližka) s výhodou snadné obrobitelnosti, s vysokou škálou povrchových úprav, avšak filozofie materiálu neodpovídá hi-tech designu

- Kov (tahokov, perforovaný plech, pletivo, síť) s výhodou vysoké akustické efektivity, nehořlavosti, a vysoké translucentnosti, avšak s nízkou mechanickou odolností a komplikovanou obrobiteľnosť
- Sklo (tabulové, Glasio) s výhodou luxusního vzhledu, vysoké translucentnosti a nehořlavosti, avšak s komplikovanou obrobiteľnosť a vysokou cenou
- Plast (Plexisklo, polykarbonát) s výhodou snadné obrobiteľnosti, avšak vysokou hořlavostí a nízkou mechanickou odolností
- Kompozit (bond, Corian, kompakt, GRP) s výhodou snadné obrobiteľnosti a hi-tech designovým vzhledem, avšak vysokou cenou u některých typů

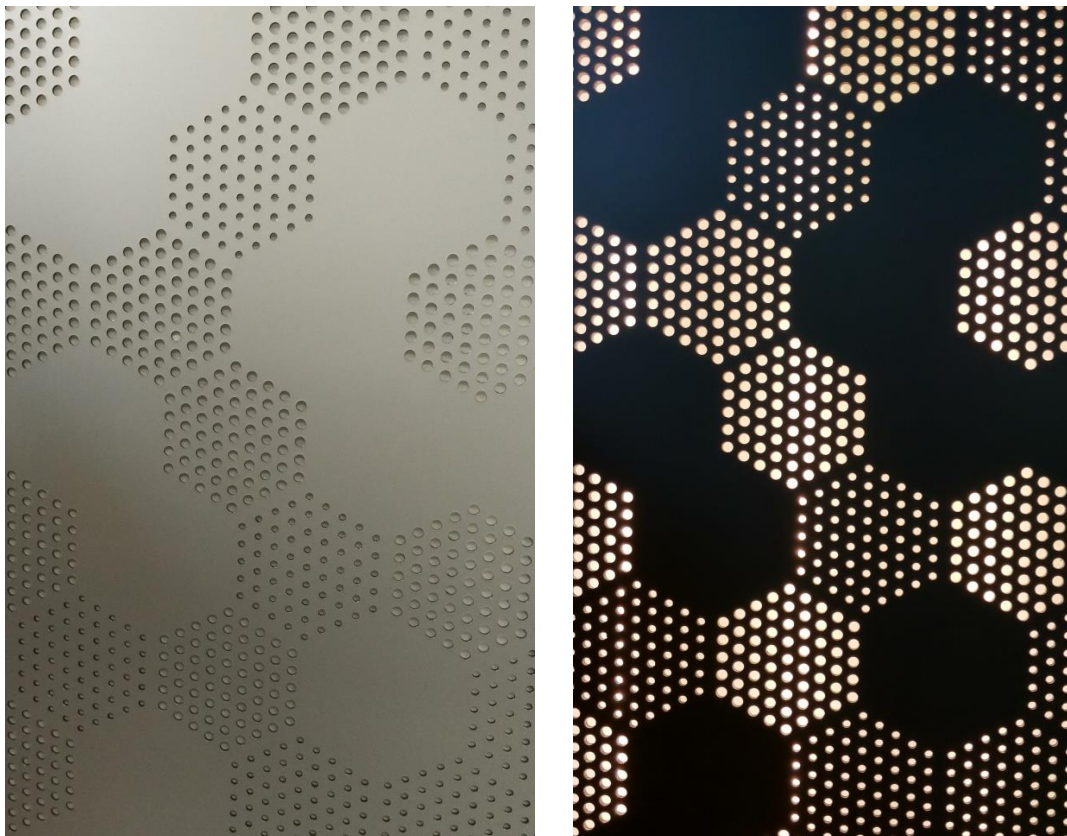
### ***U.5.1. Perforované panely s nanovláknennou membránou***

První realizací je akustický prvek, založený na perforovaném panelu z kompozitu BOND s hliníkovým povrchem, opatřeném nanovláknennou membránou, která umožňuje průchod světla. Prvek je tak navržen jako světelný akustický panel o rozměrech 1200 x 600 pro aplikaci do prostorové akustiky (obraz 28). Jde o sendvičový panel kovového designu, tloušťky 4 mm a nízké hmotnosti. Panel je složený ze tří vrstev – hliníkový plech / polyetylenové jádro / hliníkový plech. Tato skladba dává materiálu vysokou tuhost, sníženou hořlavost a kvalitní a estetické povrchy. Jeho technologie výroby a sendvičová skladba eliminuje dilatace materiálu, proto jej lze aplikovat i ve velkých formátech – 1300×3000 mm. Materiál lze snadno formátovat a frézovat. Pro zajištění optimální akustické absorpce je vytvořena zcela specifická perforace, která naplňuje predikci pro optimální akustický efekt - kruhový otvor o průměru 7 a 10 mm, rozteč jednotlivých otvorů 32×17 mm. Samotná perforace je zpracována tak, že vytváří hexagonální kompozici navazující z panelu na panel a při prosvícení vytváří velmi dekorativní a moderní detail v podobě nekonečné mozaiky. Jde o princip estetického sjednocení plochy obkladu, který je vizuálně „bezespárý“. K uchycení panelu slouží systémový hliníkový rošt, který umožňuje rektifikace ve 3 směrech. Samotný panel je následně k roštu lepen. Právě pomocí roštu lze variovat s celkovou skladebnou tloušťkou obkladu od 50 do 300 mm (obraz 27). Specifickým detailem je rozmístění LED zdrojů pro maximalizaci světelného efektu. LED pásy s výkonem 9,6 W/m, 890 lm/m byly rozmístěny v osové vzdálenosti 200 mm.



Obraz 27: příčný řez světelného panelu 1200x600.





*Obraz 28: foto realizace akustických prvků pro aplikace v prostorové akustice. Světelný panel 1200x600 (vlevo), prosvětlený (vpravo).*

### ***U.5.2. Flexibilní mřížky s nanovláknennou membránou***

Cílem návrhu byl panel, který by byl materiálovou alternativou do podhledových rastrů typu T24 v rozteči 600×600 mm. V případě podhledového panelu bylo cílem nalézt nosný materiál, který ze své vizuální podstaty je spíše skrytý a při pohledu z větší vzdálenosti zcela neznatelný. Materiál, který umožní maximální efektivitu akustické absorpce podhledu s nanovláknennou vrstvou. Vzhledem k tomu že materiál nemusí vykazovat vysokou mechanickou odolnost, byly vybírány materiály uspořádané do mřížky s velikostí jednotlivých ok v rozmezí 4×4 mm až 8×8 mm. Jako podklad pro stanovení tohoto intervalu byla využita data z provedených měření činitele zvukové pohltivosti. Panel má homogenní konstrukci v celé své ploše.

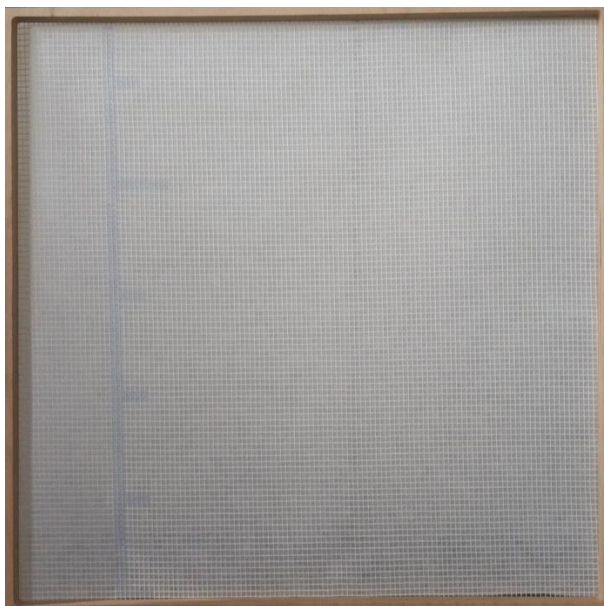
Jako technicky akceptovatelné varianty byly posuzovány tyto:

- Sít' ze skelného vlákna s výhodou nízké ceny, jednoduchého zpracování a vysoké translucenčnosti, avšak s jistou tvarovou nestabilitou mřížky v čase
- Kov (tahokov, pletivo, sítě) s výhodou vysoké akustické efektivity, nehořlavosti a vysoké translucenčnosti, avšak s problematickou montáží a tvarovou nestabilitou mřížky v čase.

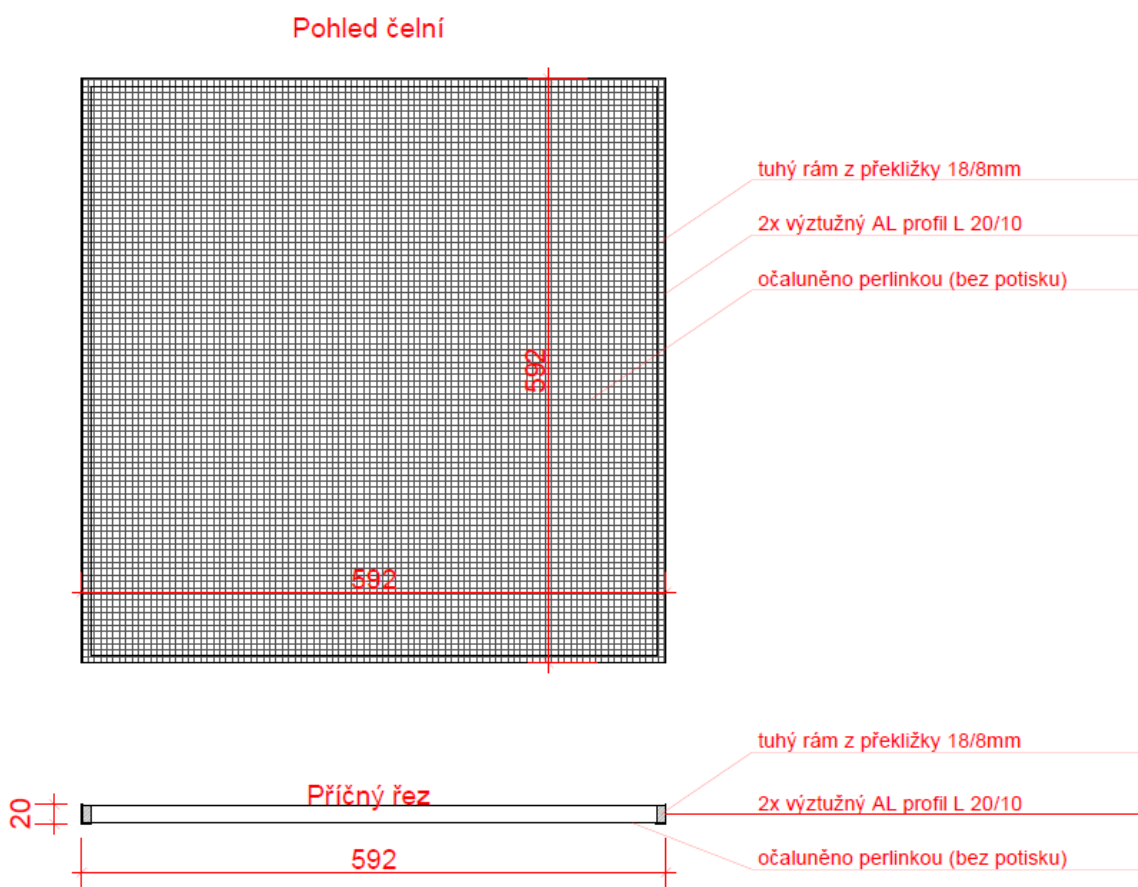
Vzhledem ke snaze vytvořit ekonomicky vhodné řešení, byla zvolena mřížka ze skelného vlákna (stavební perlinka) s adekvátní velikostí a roztečí otvorů mřížky (obraz 29). Ta je připevněna na subtilní rámy z multiplexu tl. 18mm a perlinka je předepnuta do fixačních L-profilů (obraz 30). Na tuto plochu s rámem byla



následně kaširována nanovláknenná vrstva. Tímto způsobem bylo dosaženo maximální translucence a čistoty detailu skrytého v pohledu. Specifickým detailem je rozmístění LED zdrojů pro maximalizaci světelného efektu. LED pásy s výkonem 9,6 W/m, 890 lm/m byly rozmístěny v osové vzdálenosti 300 mm.



Obraz 29: realizace akustických prvků pro aplikace v prostorové akustice. Světelný pohled 600x600.



Obraz 30: pohled a příčný řez světelného panelu z mřížky 600x600.

### ***U.5.3. Barevné řešení nanovláknenné membrány***

Pro zvýšení aplikačního potenciálu, byl navržen koncept barvení nanovláknenné vrstvy, kdy pigment je přidán do roztoku polymeru, ze kterého jsou nanovláknena elektrostaticky zvlákněna (obraz 31).



*Obraz 31: barevné nanovláknenné vrstvy vyrobené z roztoku polymeru.*

# KAPITOLA I: MĚŘÍCÍ METODY PRO STANOVENÍ AKUSTICKÝCH VLASTNOSTÍ NANOVLÁKENNÝCH MEMBRÁN

## I.1. METODA STANOVENÍ Činitele ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI POMOCÍ DVOU-MIKROFONOVÉ IMPEDANČNÍ TRUBICE

Metoda je založena na hodnocení zvukově pohltivých vlastností materiálů při kolmém dopadu zvukových vln. Zařízení slouží ke stanovení činitele zvukové pohltivosti (sound absorption coefficient  $\alpha$  [-]) laboratorních kruhových vzorků o průměru 100mm pro frekvenční rozsah 50 – 1600 Hz a 29mm pro frekvenční rozsah 500 – 6400 Hz podle normy ASTM E1050-08. Výsledná křivka činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku je pak kombinací dat z měření materiálů v trubicích o vnitřním průměru 100 a 29mm.

Norma	ČSN ISO 10534-1 (730501), ASTM E1050-08
Frekvenční rozsah	50 – 6400 Hz
Velikost vzorku 1	100 mm (průměr kruhového vzorku)
Velikost vzorku 2	29 mm (průměr kruhového vzorku)

Vzhledem k tomu, že velikost perforací akustického prvku často dosahuje průměru malé trubice, byla většina vzorků měřena pouze ve velké trubici o průměru 100mm a zařízení pro stanovení činitele zvukové pohltivosti bylo tak využito pro měření omezeného frekvenčního spektra 100 – 1600Hz. Tyto frekvence dostatečně pokrývají oblast řešení, které je zaměřeno zejména na střední a nižší frekvence zvuku.

Činitel zvukové pohltivosti je po optimalizaci parametrů daného materiálu dále měřen v dozvukové místnosti, kde je zpravidla testováno cca 20m<sup>2</sup> materiálu. Nepřesnou alternativou, používanou v automobilovém průmyslu je alfa kabina, která testuje cca 1m<sup>2</sup> materiálu. V prostorové akustice je materiálově vyřešený prostor testován in-situ.

## I.2. METODA STANOVENÍ VLOŽNÉHO ÚTLUMU POMOCÍ ČTYŘ-MIKROFONOVÉ IMPEDANČNÍ TRUBICE

Metoda je založena na hodnocení „zvukově izolačních“ vlastností materiálů při kolmém dopadu zvukových vln. Zařízení slouží ke stanovení vložného útlumu (transmission loss L [dB]) laboratorních kruhových vzorků o průměru 100mm pro frekvenční rozsah 300 – 1600 Hz a 29mm pro frekvenční rozsah 500 – 6400 Hz podle normy ASTM E2611-09. Výsledná křivka vložného útlumu v závislosti na frekvenci zvuku je pak kombinací dat z měření materiálů v trubicích o vnitřním průměru 100 a 29mm.

Norma	ČSN ISO 10534-2, ASTM E2611-09
Frekvenční rozsah	300 – 6400 Hz, resp. 315 – 5040 Hz (třetinooktávové pásmo)
Velikost vzorku 1	100 mm (průměr kruhového vzorku)
Velikost vzorku 2	29 mm (průměr kruhového vzorku)

Tato metoda byla využita pouze pro měření rezonančního chování nanovlákných membrán, nikoli pro stanovení vložného útlumu membrán, který je dle předpokladu minimální.



*Obraz 32: Zařízení pro měření činitele zvukové pohltivosti materiálů (a) Zařízení pro měření vložného útlumu materiálů (b)*

Následuje publikace, která se zabývá studiem rezonančního chování nanovlákných membrán o různé plošné hmotnosti a rozdílném průměrném průměru nanovláken pomocí obou uvedených měřících metod.

- K. Kalinová, “Nanofibrous Resonant Membrane for Acoustic Applications,” Journal of Nanomaterials, vol. 2011, Article ID 265720, 6 pages, 2011. doi:10.1155/2011/265720; ISSN:1687-4110 (Print); ISSN: 1687-4129 (Online)

## Research Article

# Nanofibrous Resonant Membrane for Acoustic Applications

**K. Kalinová**

*Department of Nonwovens, Faculty of Textile Engineering, Technical University of Liberec, Studentská 2, 46117 Liberec, Czech Republic*

Correspondence should be addressed to K. Kalinová, klara.kalinova@tul.cz

Received 16 May 2011; Accepted 22 July 2011

Academic Editor: Sadhan C. Jana

Copyright © 2011 K. Kalinová. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Because the absorption of lower-frequency sound is problematic with fibrous material made up of coarser fibers, highly efficient sound absorption materials must be developed. The focus of this paper is on the development of a new material with high acoustic absorption characteristics. For low-frequency absorption, structures based upon the resonance principle of nanofibrous layers are employed in which the resonance of some elements allows acoustic energy to be converted into thermal energy. A nanofibrous membrane was produced by an electrostatic spinning process from an aqueous solution of polyvinyl alcohol and the acoustic characteristics of the material measured. The resonant frequency prediction for the nanofibrous membrane is based on research into its production parameters. The distance between electrodes during the electrostatic spinning process determines the average diameter of the nanofibers, and the outlet velocity of the material determines its area density. The average diameter of nanofibers was measured using the Lucia software package directly from an electron microscope image. The resonant frequency of nanofibrous membranes was determined from the sound absorption coefficient and transmission loss measurement.

## 1. Introduction

This paper deals with the acoustic behavior of a nanofibrous resonant membrane. A nanofibrous layer was produced by an electrical spinning process from an aqueous solution of polyvinyl alcohol and the resonance effect created by the nanofibrous layer then studied. Acoustic waves cause vibration in the resonant nanofibrous system with acoustic energy at the resonance frequency partially converted to kinetic energy, the remainder being acoustic energy at other frequencies. These frequencies are damped so that the majority of the acoustic energy, accumulated in the resonator, may be converted into heat.

This theoretical study of sound absorption characteristics [1] focuses on a membrane-type sound absorber. To analyze the absorption mechanism, the solution is rearranged in a form which points out the contribution from each element in the membrane-type sound absorber. The effects of the parameters of the sound absorption system are discussed in the light of the calculated results. In addition, the method used for predicting peak frequency and the peak value of the oblique-incident absorption coefficient of the membrane-type sound absorber is presented. This method satisfactorily

explains the relationship between the absorption characteristics and the parameters.

A sound-absorbing structure using thin film is described in a patent [2]. When a soundwave makes contact with the sound-absorbing structure of the invention, the thin films vibrate and contacts between the overlapping portions rub against each other. The energy contained in the soundwave dissipates as a result, and a high sound absorption coefficient over a broad frequency band is obtained. The sound absorption effect is intensified by the addition of the damping effect as the soundwave passes through the interstices.

Because the absorption of lower-frequency sound is problematic with fibrous material made up of coarser fibers, highly efficient sound absorption materials must be developed. The focus of this paper is therefore on the development of a new material with high acoustic absorption characteristics.

Previous work [3, 4] has shown this nanofibrous material to be a highly efficient sound absorber. For low-frequency absorption, structures based upon the resonance principle are employed in which the resonance of some elements allows acoustic energy to be converted into thermal energy. Earlier work [3] has demonstrated that the nanofibrous



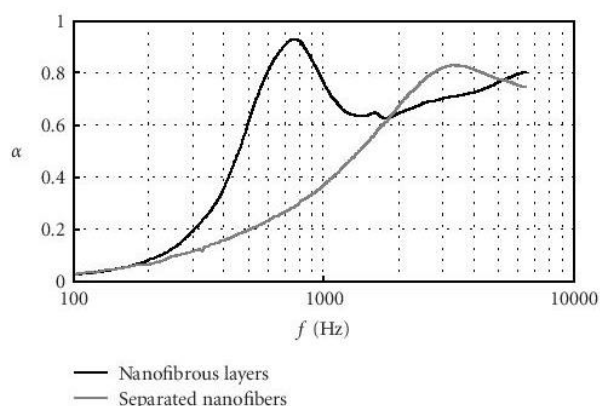


FIGURE 1: Frequency dependence of sound absorption coefficient  $\alpha$ . Nanofibers creating a layer (black curve) and nanofibers distributed separately in the sample (grey curve). The final thickness of both materials is 30 mm, with a bulk density of  $21 \text{ kg/m}^{-3}$ .

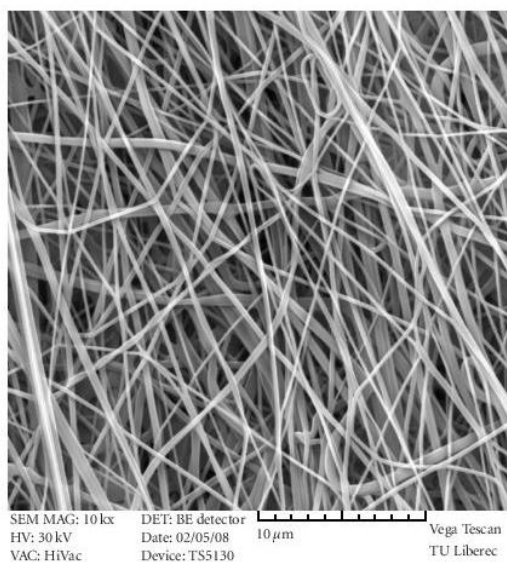


FIGURE 2: Snapshot of the nanofibrous structure.

layer has a resonant effect on sound absorption when the nanofibers are arranged with respect to the layer. Then the tops of sound absorption coefficient are displaced to the lower frequencies than those of sample with nanofibers distributed separately (see Figure 1).

The sound absorption peaks of longitudinally laid samples occur at frequencies lower than those of samples laid perpendicularly [4].

This is attributable to motion in the nanofibrous layer. When the longitudinal soundwave propagates perpendicularly to the alignment of the membrane, the nanolayer is able to move and changes in acoustic energy may occur. The second effect is due to the viscosity of the surrounding air, where acoustic energy is consumed by the drag between

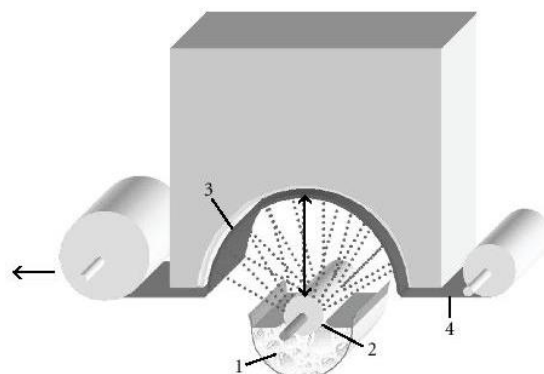


FIGURE 3: A device for the production of nanofibers from a polymer solution. The polymer solution (1) wets the cylindrical electrode (2). This electrode is matched with a counter electrode (3) whose potential differs. By rotating electrode (2), the polymer solution is drawn from the container into the counter electrode. The nanofibers form in the electrical field and are deposited on the support material (4). The electrode distance during electrostatic spinning and the outlet velocity of the material, which controls its area, may be altered.

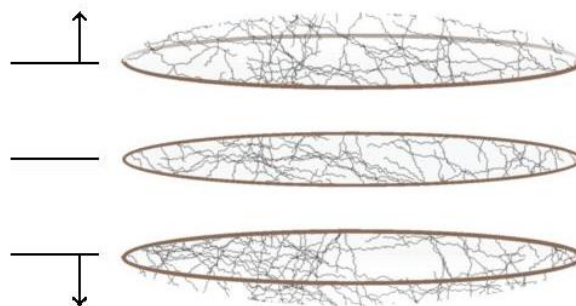


FIGURE 4: Nanofibrous membrane vibration at the first resonant frequency.

vibrating air particles and the pore surface, converting the acoustic energy into thermal energy. These two nanofibrous layer phenomena together constitute the innovation of this acoustic product compared to current materials used for sound absorption such as foil and fibrous board.

## 2. Experimental

The nanofibrous membrane was produced by an electrostatic spinning process from an aqueous solution of polyvinyl alcohol (see Figure 2), and two acoustic characteristics of the material, the sound absorption coefficient and the transmission loss, were measured. In this case, the nanofibrous membrane was created without any support materials from an aqueous solution, but a nonsoluble solution may also be used to produce a nanofibrous membrane possessing the same parameters and physical characteristics.

Two production parameters, the electrode distance during the electrostatic spinning process and the outlet velocity

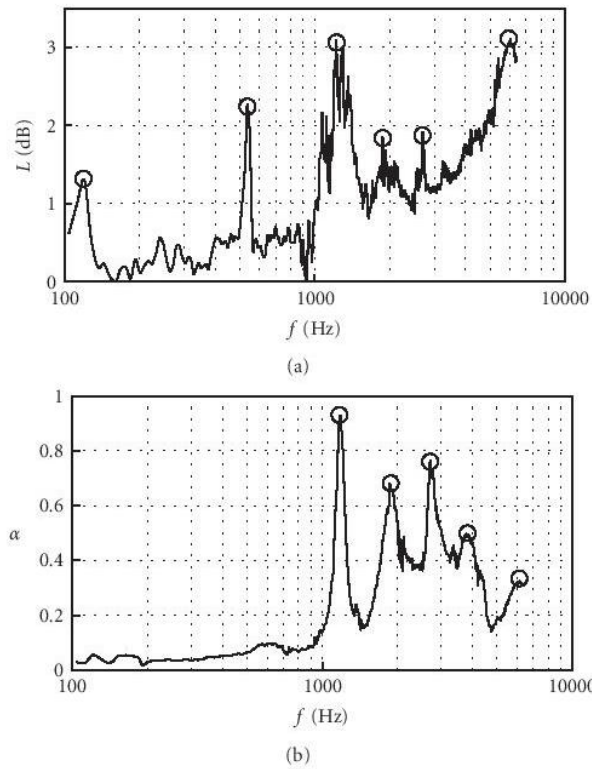


FIGURE 5: Frequency dependence of transmission loss  $L$  (dB) with denoted resonant peaks (a) and frequency dependence of sound absorption coefficient  $\alpha$  with denoted resonant peaks (b).

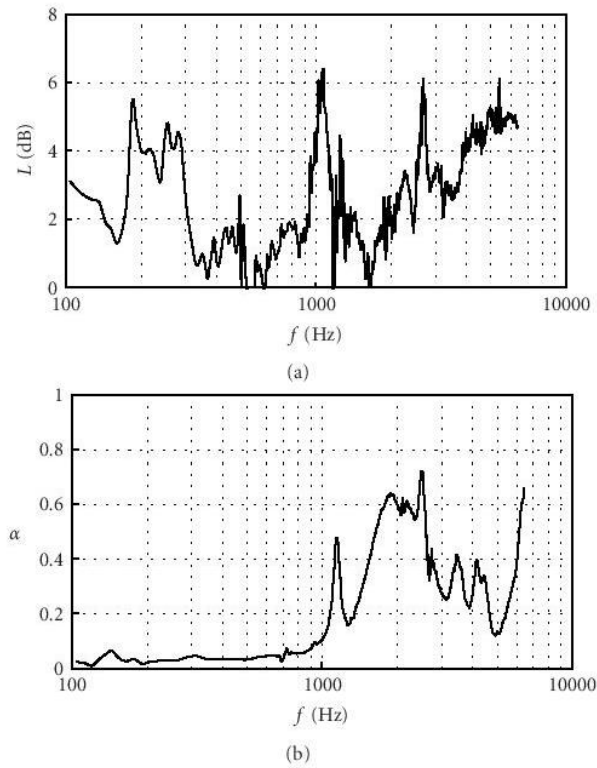


FIGURE 6: Measured frequency dependence of transmission loss  $L$  (dB) (a) and sound absorption coefficient  $\alpha$  (b). The area density of the nanofibrous layer is  $28.8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ .

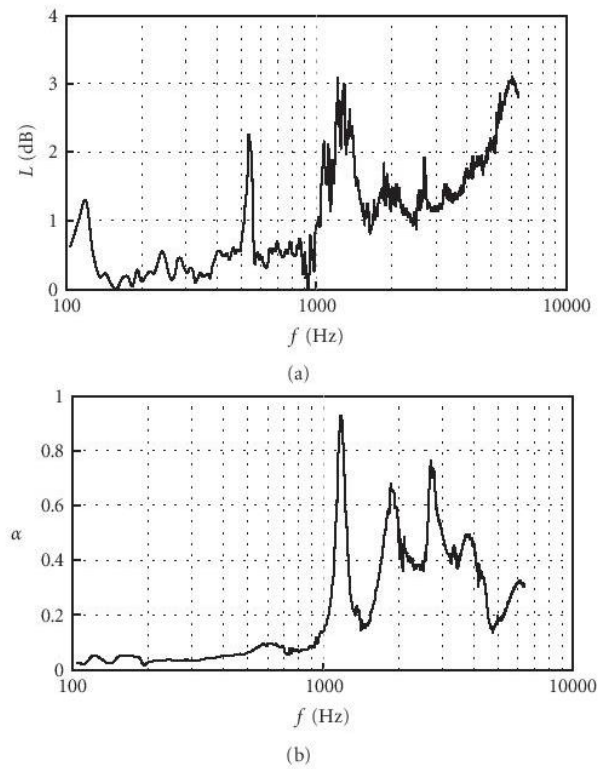


FIGURE 7: Measured frequency dependence of transmission loss  $L$  (dB) (a) and sound absorption coefficient  $\alpha$  (b). The area density of the nanofibrous layer is  $17.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ .

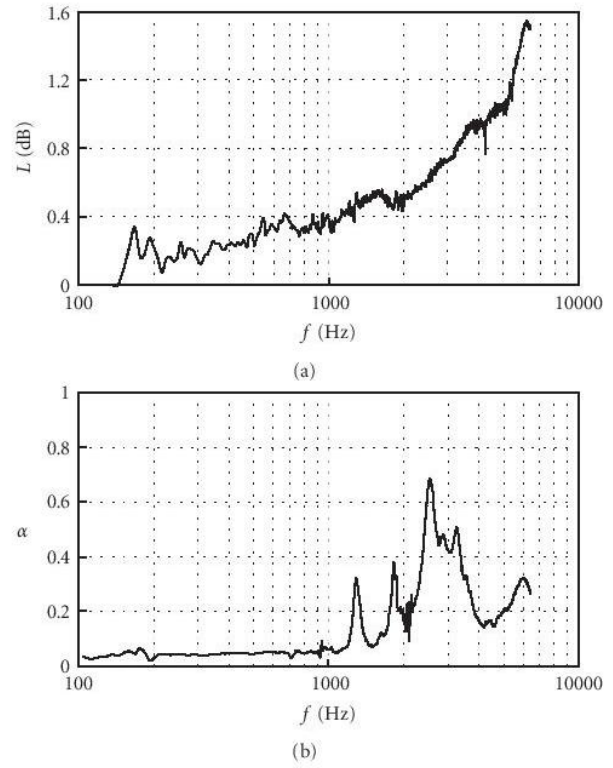


FIGURE 8: Measured frequency dependence of transmission loss  $L$  (dB) (a) and sound absorption coefficient  $\alpha$  (b). The area density of the nanofibrous layer is  $6.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ .



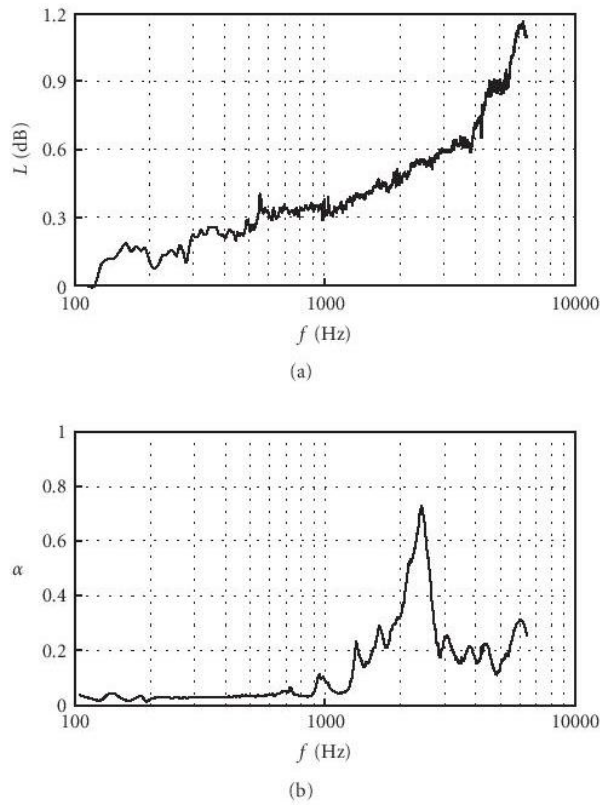


FIGURE 9: Measured frequency dependence of transmission loss  $L$  (dB) (a) and sound absorption coefficient  $\alpha$  (b). The area density of the nanofibrous layer is  $4.8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ .

of the material, which controls its area density, were altered (see Figure 3). Changes in the nanofibrous layer structure in terms of specific anisotropy and the diameter of the nanofibers are the result of the electrode distance setting.

A Type 4206 Impedance Measurement Tube featuring dual microphones was used to measure the sound absorption coefficient and transmission loss in the 50 Hz–6.4 kHz range.

In this experimental section, the resonant frequencies from the sound absorption coefficient and transmission loss measurement are compared. The maximum value of the sound absorption coefficient and transmission loss occurs along the resonant frequency of the thin membrane. Soundwaves vibrate the resonant nanofibrous system, with acoustic energy at the resonant frequency (see Figure 4) then partially converted to kinetic energy, the remainder being acoustic energy at other frequencies. These frequencies are damped so that the majority of the acoustic energy, accumulated in the resonator, may be converted to heat.

Resonant frequencies are labeled with circles in Figure 5.

The resonant frequency of nanofibrous membranes was determined from the sound absorption coefficient and transmission loss measurement. Two dependency relationships were studied to determine the resonant frequency.

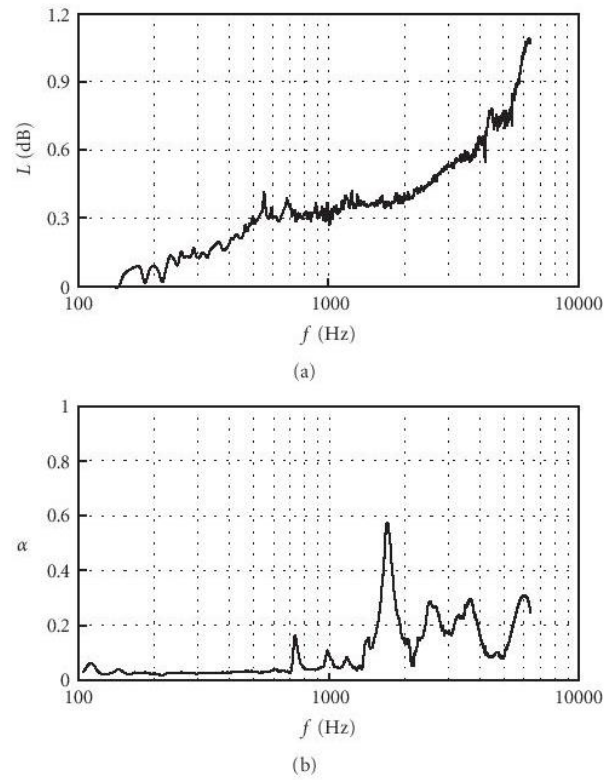


FIGURE 10: Measured frequency dependence of transmission loss  $L$  (dB) (a) and sound absorption coefficient  $\alpha$  (b). The area density of the nanofibrous layer is  $3.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ .

TABLE 1: Production parameter during electrostatic spinning. Outlet velocity of material determining its area density.

Outlet velocity of nanofibrous material during electrostatic spinning ( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ )	Area density of the nanofibrous layer ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )
0.0171	28.8
0.0342	17.2
0.0855	6.3
0.1197	4.8
0.171	3.3

### 3. Results

In this section, the results measured for the frequency dependence of sound absorption coefficient  $\alpha$  and transmission loss  $L$  (dB) are compared. The outlet velocity of the material determines its area density (see Table 1) and the distance between electrodes during the electrostatic spinning process determines the average diameter of the nanofibers (see Table 2).

**3.1. Electrode Distance Constant (50 mm) with Changing Area Density of the Nanofibrous Membrane.** From Figures 6, 7, 8, 9, and 10 (a), it is evident that the maximum value for transmission loss  $L$  (dB) decreases with decreasing



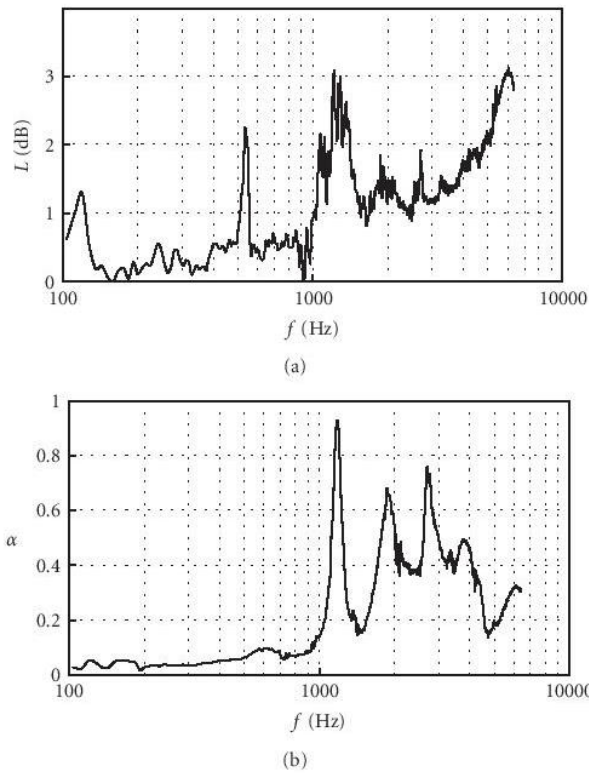


FIGURE 11: Measured frequency dependence of transmission loss  $L$  (dB) (a) and sound absorption coefficient  $\alpha$  (b). The electrode distance is 50 mm.

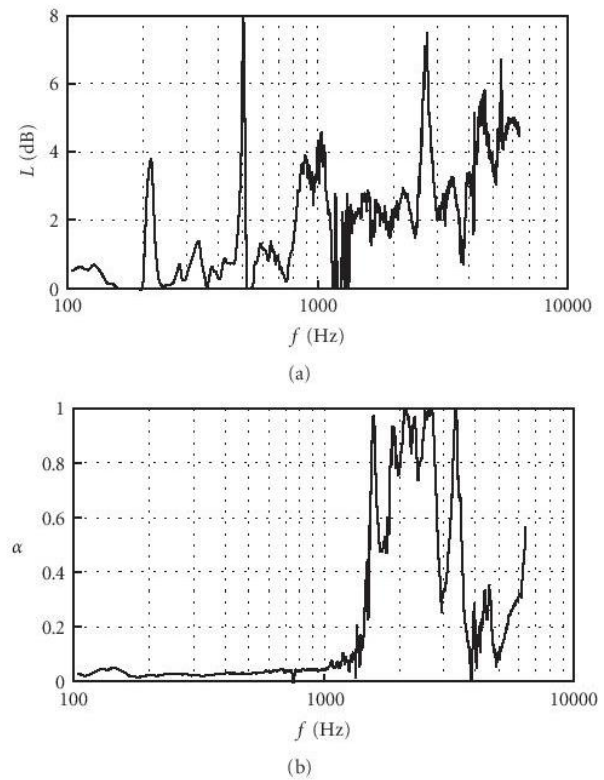


FIGURE 12: Measured frequency dependence of transmission loss  $L$  (dB) (a) and sound absorption coefficient  $\alpha$  (b). The electrode distance is 90 mm.

TABLE 2: Production parameter during electrostatic spinning. Distance of electrodes during electrostatic spinning which determines the average diameter of nanofibers.

Distance of electrodes during electrostatic spinning (mm)	Average diameter of nanofibers (nm)
50	79.9
70	77.6
90	76.3
110	73.3
130	68.6

area density of the nanofibrous membrane. The resonant frequencies of the lower area density of the membrane (see Figures 8–10 (a)) are not uniquely determined.

Figures 6–10 (b) show that the first significant peak in the sound absorption coefficient  $\alpha$  has been displaced in the direction of lower frequencies with increasing area density of the material, when the average nanofiber diameter (the electrode distance during electrostatic spinning) is held constant. The resonant frequency of the nanofibrous membrane thus decreases with the area density of the nanofibrous membrane.

Comparing results from the examination of both acoustic characteristics (see Figures 6–10, with transmission loss

$L$  (dB) (a) and the sound absorption coefficient  $\alpha$  (b)) shows that the resonant frequencies are not in agreement. The peaks occurring under each measurement are formed at different frequencies.

**3.2. Area Density of the Nanofibrous Membrane is Constant ( $17.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ) with Changing Electrode Distance.** Figures 11, 12, 13, and 14 (b) show that the first significant peak in the sound absorption coefficient  $\alpha$  has been displaced in the direction of higher frequencies with decreasing average nanofiber diameter (increasing electrode distance during electrostatic spinning) when the area density of the material is held constant. The resonant frequency of the nanofibrous membrane thus increases with decreasing average nanofiber diameter.

Comparing results from the examination of both acoustic characteristics (see Figures 11–14, with transmission loss  $L$  (dB) (a) and the sound absorption coefficient  $\alpha$  (b)) shows that the resonant frequencies are not in agreement. The peaks occurring under each measurement are formed at different frequencies.

The measurement of transmission loss shows two peaks, one at 530 Hz and one at 2700 Hz, for all measurements using constant area density (see Figures 11–14 (a)). 530 Hz and 2700 Hz would thus be resonant frequencies of the measuring apparatus during transmission loss measurement.

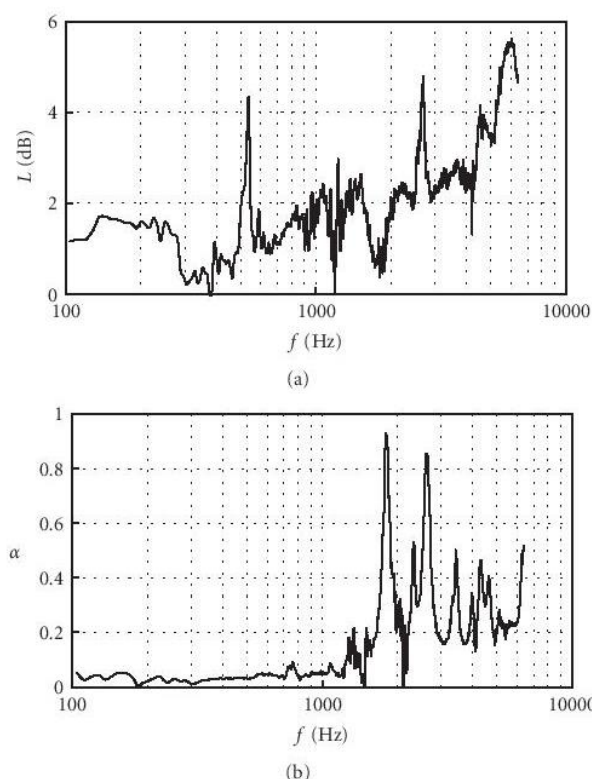


FIGURE 13: Measured frequency dependence of transmission loss  $L$  (dB) (a) and sound absorption coefficient  $\alpha$  (b). The electrode distance is 110 mm.

One peak is constant for all measurements using both dependencies and both acoustic characteristics measured (see Figures 6, 7, and 11–14). The resonant frequency of the measuring apparatus while measuring both acoustic characteristics is around 2700 Hz.

#### 4. Conclusions

These two phenomena, the vibration of the nanolayer and air friction inside the nanopores, constitute the innovation of this acoustic product compared to current materials used for sound absorption such as foil and fibrous board.

Sound absorption coefficient measurements show that the resonant frequency of the nanofibrous membrane decreases with increasing area density of the membrane and increases with decreasing average diameter of the nanofibers.

Comparing results from the examination of both acoustic characteristics (transmission loss  $L$  (dB) and the sound absorption coefficient  $\alpha$ ) shows that the resonant frequencies are not in agreement. The peaks occurring under each measurement are formed at different frequencies.

The transmission loss measurement shows that 530 Hz and 2700 Hz would be the resonant frequencies of the measuring apparatus during transmission loss measurement.

One peak is constant for all measurements using both dependencies and both acoustic characteristics measured.

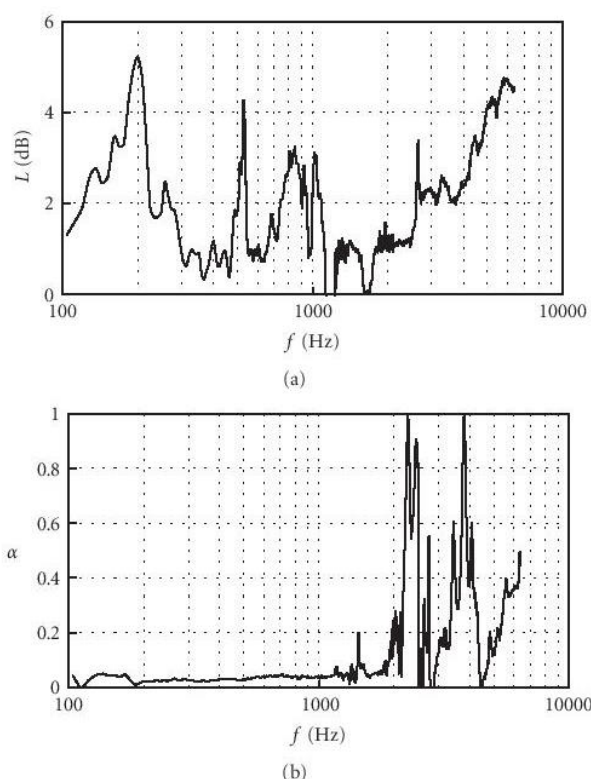


FIGURE 14: Measured frequency dependence of transmission loss  $L$  (dB) (a) and sound absorption coefficient  $\alpha$  (b). The electrode distance is 130 mm.

The resonant frequency of the measuring apparatus while measuring both acoustic characteristics is around 2700 Hz.

#### Acknowledgement

The contribution was sponsored by the postdoctoral project of the Czech Science Foundation (GAČR), 106/07/P044 Transport and Absorption of Sound in Nanofibres Assemblies.

#### References

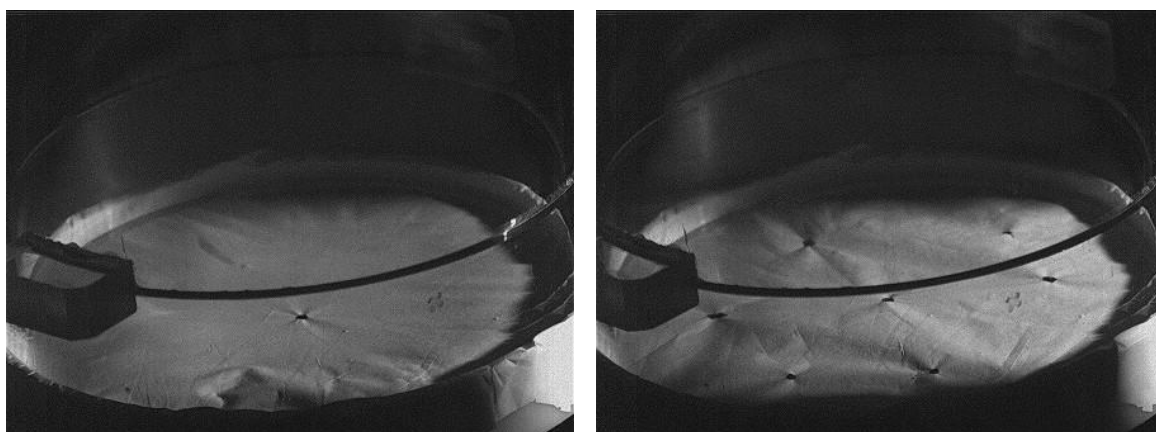
- [1] K. Sakagami, M. Kiyama, M. Morimoto, and D. Takahashi, "Sound absorption of a cavity-backed membrane: a step towards design method for membrane-type absorbers," *Applied Acoustics*, vol. 49, no. 3, pp. 237–247, 1996.
- [2] Z. Yamaguchi et al., "A sound-absorbing structure using thin film," EP1598808, 2005-11-23.
- [3] K. Kalinová and O. Jirsák, "Resonance effect of nanofibrous layer," in *Proceedings of the 5th Autex World Textile Conference*, Portorož, Slovenia, 2005.
- [4] K. Kalinová, "Influence of nanofibrous membrane configuration on the sound absorption coefficient and resonant frequency," in *Proceedings of the 6th Autex World Textile Conference*, Raleigh, NC, USA, 2006.

### I.3. STANOVENÍ REZONANČNÍCH FREKVENCÍ NANOVLÁKENNÉ MEMBRÁNY POMOCÍ OPTICKÉ METODY

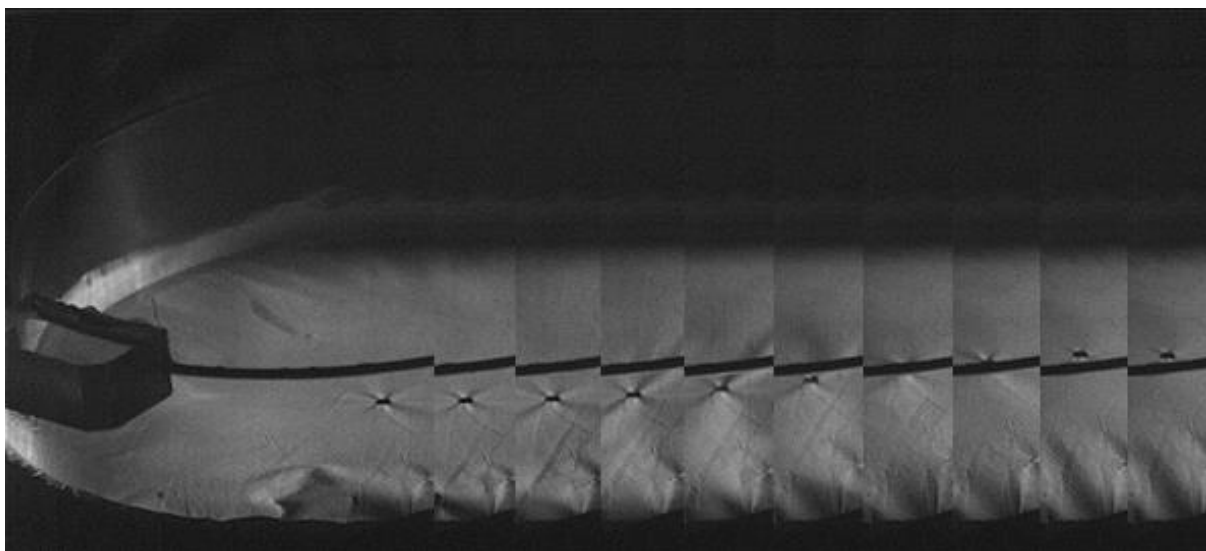
Metoda spočívá ve snímání kmitů membrány upnuté do kruhového rámu v průhledné trubici pomocí vysokorychlostní kamery (obraz 33). Výsledkem je grafické znázornění výchylky membrány v závislosti na frekvenci zvuku, která membránu rozkmitává. Frekvence je skokově laděna v hrubé škále, následně je v okolí maxim zjemněna pro získání přesnější hodnoty rezonanční frekvence membrány daných parametrů. Výchylka membrány je v závislosti na jejích parametrech, zejména tuhosti, viditelná okem a dosahuje hodnoty jedné amplitudy až 2,5mm (obraz 34). Měřicí řetězec obsahuje následující komponenty:

- průhledná trubice o průměru vnitřní stěny 100mm.
- audio signální generátor se zesilovačem
- autoreproduktor (kruhový pro kruhovou trubici)
- vysokorychlostní kamera (optický snímač)

Alternativou s přesnějšími výsledky je stanovení rezonančních frekvencí nanovlákenné membrány pomocí laserového vibrometru Ometron VH-1000-D, který snímá výchylku jednoho bodu na membráně, přičemž odpadá vyznačení bodu, které může deformovat nanovlákennou strukturu. Stanovení rezonančního chování nanovlákenných membrán pomocí tohoto vibrometru ověřil Doc. Petr Šidlof. Pro stanovení komplexního chování membrán byl dále využit laserový skenovací vibrometr, který při zvolené frekvenci zvuku snímá postupně celý povrch membrány a vyhodnocuje výchylku sítě bodů. Variantní metody jsou předmětem dizertační práce Ing. Tomáše Ulricha, kterému je autorka školitelkou, proto se tato habilitační práce nebude těmito metodikami dále zabývat. Předmětem dalšího společného výzkumu v následujícím období bude dále přesné stanovení radiálního napětí membrány, které spolu s její plošnou hmotností určuje hodnotu rychlosti šíření příčné vlny na membráně (vztah 3 bude dále uvedený v kapitole II).



*Obraz 33: foto nanovlákenné vrstvy upnuté v trubici. Sledované body membrány byly vyznačeny v jedné, nebo více klíčových pozic.*



*Obraz 34: foto nanovlákněné vrstvy upnuté v trubici. Obraz, snímáný vysokorychlostní kamerou Olympus i-speed2, je poskládán s 10 po sobě jdoucích momentů od minimální pozice po maximální plohu sledovaného bodu při kmitání membrány (dává dohromady součet obou amplitud).*

Následuje publikace věnovaná návrhu a studiu účelnosti této metody pro stanovení rezonančního chování membrán z nanovlákněné vrstvy o různých plošných hmotnostech.

- Klara Kalinova, Merve K. Ozturk and Michal Komarek. „Open and closed tube method for determination of resonance frequencies of nanofibrous membrane“, *The Journal of The Textile Institute*, **2015**, <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00405000.2015.1083353>

Tímto tématem se dále zabývají následující publikace autorky:

- Ozturk M.K., Kalinova K., Nergis B., Candan C. „Comparison of Resonant Frequency of Nanofibrous Membrane and Homogenous Membrane Structure“, *Textile Research Journal*, published online before print June 13, in print in Volume 83 Issue 20 December, **2013**, DOI: 10.1177/0040517513490064, Print ISSN: 0040-5175, Online ISSN: 1746-7748
- M.K. Ozturk, B. Nergis, C. Candan, K. Kalinova, „The Effect of Measuring Equipment Settings on the Resonant Behavior of Nanofibrous Membrane“ *The International Istanbul Textile Congress 2013*, May 30th to June 1th **2013**, Istanbul, Turkey
- ULRICH, T. a K. KALINOVÁ. Determination of Resonant Frequencies of Nanofibrous Membrane by High-speed Camera. *Nanocon 2016*. Ostrava, Czech Republic: TANGER Ltd., 2016, s. 251 – 256. ISBN 978-808729471-0





## Open and closed tube method for determination of resonance frequencies of nanofibrous membrane

Klara Kalinova, Merve K. Ozturk & Michal Komarek

To cite this article: Klara Kalinova, Merve K. Ozturk & Michal Komarek (2016) Open and closed tube method for determination of resonance frequencies of nanofibrous membrane, The Journal of The Textile Institute, 107:8, 1068-1078

To link to this article: <http://dx.doi.org/10.1080/00405000.2015.1083353>



Published online: 01 Sep 2015.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 114



View related articles [↗](#)



View Crossmark data [↗](#)



Citing articles: 1 View citing articles [↗](#)

Full Terms & Conditions of access and use can be found at  
<http://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=tjt20>

## Open and closed tube method for determination of resonance frequencies of nanofibrous membrane

Klara Kalinová<sup>a\*</sup>, Merve K. Oztürk<sup>b</sup> and Michal Komárek<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Centre for Nanomaterials, Advanced Technologies and Innovations, Technical University of Liberec, Liberec, Czech Republic;

<sup>b</sup>Faculty of Textile Technologies and Design, Technical University of Istanbul, Istanbul, Turkey

(Received 8 September 2014; accepted 6 August 2015)

Nanofibrous layer performs as a membrane that vibrates at low frequencies. This property is obtained by nano dimensions of the interfiber areas. Sound waves incident on the acoustic resonance membrane make the membrane oscillate, and the maximum amplitude occurs in the case of resonance. The structures based on the nanofibrous layers are employed for low-frequency sound absorption. The resonance of the nanofibrous elements allows acoustic energy to be converted into thermal energy. In this article, a nanofibrous layer was produced by electrostatic spinning from an aqueous solution of polyvinyl alcohol and the resonance effect of nanofibrous layer was studied. For this purpose, the new method developed for determination of resonance frequencies of a membrane was employed. The ultimate objective of the study was to assess the effect of mass per unit area on resonance frequencies of the membrane placed in an open and closed tube. The results indicated that the resonance frequencies of the membrane decreased with an increase of the mass per unit area of the nanofibrous membrane. Except for the lowest frequencies (first resonance peak), the resonant behavior of the membrane was affected by the resonance of tube.

**Keywords:** open and closed tube; resonance frequency; nanofibrous membrane; PVA; electrospinning; basis weight

### Introduction

Environmental noise from sources such as traffic, industries, construction, and public work, as well as noise from indoor sources like ventilation systems and office machines, is an ever growing problem to human health. Studies on acoustic applications of textile materials started in the nineties; however, acoustic application of nanofibrous membranes is almost a new field. Nanofibrous membranes have very attractive sound absorption properties. Sound absorbents based on nanofibers can have a higher absorption factor compared to traditional absorbents, especially in lower frequencies. The study performed by Sakagami, Morimoto, and Yairi (2009) shows the resonant behavior of a micro-perforated panel for various perforation ratios in comparison with a panel-/membrane-type absorber. The sound absorption of the back wall surface is considered. The research published by Onen and Caliskan (2010) compares the predictive model of sound absorption of microperforation configurations with measurements inside the impedance tube. Absorption peaks took place at sound frequencies around 500–1000 Hz, according to perforation parameters. Kalinová (2011) focused on estimation of the resonance frequency of nanofibrous membranes from coefficient and transmission loss measurement depending on production parameters of

sound absorption membrane prepared by the electrospinning process. Mohrova and Kalinová (2012) also studied the sound absorption properties of PVA nanofibrous membranes with different structures. Water vapor was applied to the surface of a nanolayer (for 10–120 s) in order to change the structure of the membrane containing nanofibers. Also, the sound absorption coefficients of thin PVA nanofibrous membranes and foil were compared. The results of the experimental study showed that the sound absorption coefficient curves are analogical for thin polymeric foil as well as for nanofiber PVA membrane. Furthermore, when the time of the water vapor application process onto the layer from PVA nanofibers was increased, the number of local places having different basis weights due to the dissolved and merged fibers, increased. It was concluded that this might affect the resonance frequency of the membrane, and that each part of the material area resonates at a slightly different frequency due to these local places and the irregularity of the membrane. Hence, an increase in the absorbed frequency range is observed. Kalinová, in another paper (Jirsák, Kalinová, & Stránská, 2006), demonstrated that the sound absorption coefficient of the material with nanofibrous layers is, at lower frequencies, eminently higher than that basic material without nanofibers. She found that the

\*Corresponding author. Email: [klara.kalinova@tul.cz](mailto:klara.kalinova@tul.cz)



resonant nanofibrous membrane vibrates and the sound energy of lower frequencies is absorbed. A study (Ozturk, Kalinova, Nergis, & Candan, 2013) deals with the acoustic behavior of a PVA nanofibrous resonant membranes produced by needleless electrospinning. Using an experimental set-up involving a high-speed camera, the study attempted to predict the sound absorption behavior of a PVA nanofibrous membrane by determining its resonance frequency. The findings were compared with those from a homogeneous membrane structure in the form of a foil. An experimental study (Huang, Nguyen, & Jiao, 2007) demonstrated reduction of the nonlinear effect on the standing waves by a feedback loop in cylindrical tube used as a resonator. The utilization of the *high-speed camera* in the general process of vibration analysis has occurred over the past years in different application fields. The analysis of human vocal folds vibration, so-called videokymography, is described by Švec and Schutte (1996) and Inwald, Döllinger, Schuster, Eysholdt, and Bohr (2011). Wang, Mottershead, Ihle, Siebert, and Reinhard Schubach, (2011) combines the high-speed camera measurement with the finite element simulation method to determine the structural responses of materials on the full field vibration. Nabavi, Siddiqui, and Dargahi (2008) describe the utilization of the particle image velocimetry technique to measure the velocity of the standing waves within an air-filled rigid-walled square channel subjected to acoustic standing waves and compare the data with the analytical results obtained from the time-harmonic solution of the wave equation. This approach is related to our experimental setup, but in this article, the interaction of the acoustic waves with nanofibrous membranes is studied.

One widely used method of vibration measurement and analysis is laser vibrometry. This method is used in different application fields including the development and monitoring of high-speed milling devices (Tatar & Gren, 2008) or the vibration of turbines and electrical engines as described by Verma and Kumar (2006). Although laser vibrometry is a sophisticated method, the precision of the measurement can be affected by material parameters such as surface roughness (Rothberg, Halkon, Tirabassi, & Pusey, 2012). Generally, the vibration of solid objects can be studied by laser methods. However, the exception is the measurement of thin membranes which are translucent for the laser beam as in the case of the nanofibrous sheets. In this case, the laser methods are not advantageous and the utilization of high-speed camera analysis seems to be the best applicable method.

In accordance with the literature study discussed, the research for this article was conducted to investigate the effect of basis weight on resonance frequency of a membrane using an optical novel measuring method.

## Experimental work

### Material

The water solution of polyvinyl alcohol (PVA) ( $M_w = 80,000\text{--}100,000\text{ g mol}^{-1}$ ) was used for the preparation of the solution for the experiment. Glyoxal and phosphoric acid were added as cross-linking agents. The 12.8% ( $w w^{-1}$ ) PVA solution (Sloviol®, CHZ, Nováky, Slovak Republic) containing 0.38% ( $w w^{-1}$ ) glyoxal (40% ( $w w^{-1}$ ) solution of glyoxal in water) and 0.51% ( $w w^{-1}$ )  $H_3PO_4$  (85% ( $w w^{-1}$ ) phosphoric acid in water) was prepared (Filová et al., 2013). The solution containing PVA, distilled water, glyoxal, and phosphoric acid was vigorously stirred at room temperature.

### Production of nanofibrous membrane

For production of PVA nanofibrous membranes, the roller electrospinning method (Nanospider method) was used (Jirsak et al., 2006). In this method, the roller was connected to a high voltage supply, and at the top of the roller, there was a counter electrode, which was grounded (see Figure 1). Taylor cones were created on the roller surface toward the counter electrode.

Optimum process parameters such as roller speed, distance between the electrodes, and voltage were applied during the spinning process. The distance between the surface of the roller and the collector was 120 mm. A voltage of 50 kV, relative humidity of RH 34%, and temperature of 19 °C were applied during the course of electrospinning. The final layer was crosslinked by hot air at temperature of 140 °C for 5 min. In order to obtain nanofibrous membranes of different basis weights, the speed of the support materials was changed (Table 1).

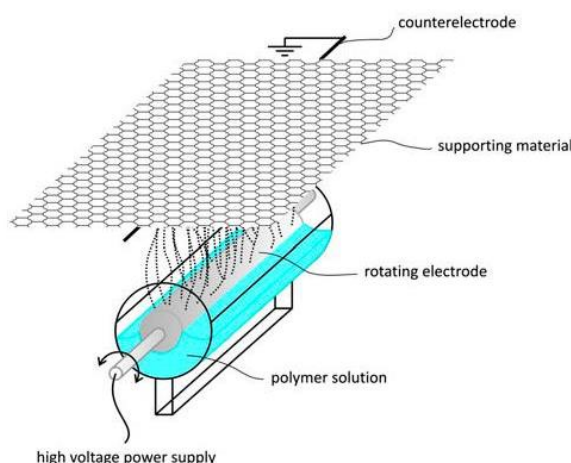


Figure 1. Schematic diagram of roller electrospinning method used for PVA nanofibrous membrane production.

Table 1. Basis weights of PU (12.8%) nanofibrous membranes.

		12.8% PVA	
Basis weight ( $\text{g m}^{-2}$ )	$3 \pm 0.04$	$7 \pm 0.14$	$15 \pm 0.11$
Supporting material speed ( $\text{m min}^{-1}$ )	0.10	0.05	0.06 (3 times)

**Characterization**

The surface and structure of the membrane and the diameter of the electrospun PVA fibers were determined using Carl Zeiss Ultra Plus Field Emission scanning electron microscopy (SEM), with an accelerating voltage of 1.48 kV. The average fiber diameter was calculated from the SEM images using image analysis software (NIS Elements BR 3.2). More than 100 fibers were counted from at least 4 SEM images which were taken from different places of a sample. The average diameter of PVA nanofibrous membranes was kept constant in  $240 \pm 100$  nm to analyze solely the effect of basis weight on resonance frequencies of the membrane. Figure 2 shows the morphology of electrospun PVA nanofibers with a concentration of 12.8%.

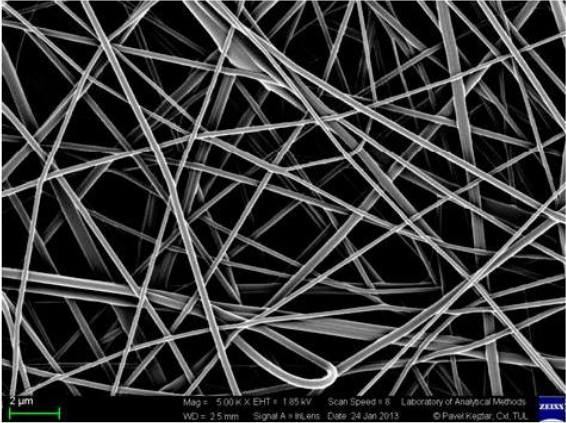


Figure 2. SEM images of PVA (12.8%) nanofibers with basis weights of (a)  $3 \text{ g m}^{-2}$ , (b)  $7 \text{ g m}^{-2}$  and (c)  $15 \text{ g m}^{-2}$ . Marked scale is  $1 \mu\text{m}$ .

**Optical method for determination of resonant frequency**

The new method for determining the resonance frequencies of the membranes was utilized. The main components of the system used during the experiments were the digital camera (Olympus – System i-SPEED2), an LCD display panel of 8.4", and a transparent tube (see Figure 3).

During our study, a frequency of  $2000 \text{ frames s}^{-1}$  was used at the preset resolution of  $800 \times 600$  pixels. A

mark was drawn on the center of each sample in order to focus the lens of the camera. The zoom setting was maintained at 1.39:1, and the distance between the camera and the transparent tube was 500 mm with an angle of  $25^\circ$ .

The tested sample was fixed in a position of 0.395 m from the sound source inside the tube of total length 0.62 m. A speaker at the end of the tube excited



Figure 3. Scheme of the measuring system with the detail of real nanofibrous membrane.



Table 2. Positions of the nodes and antinodes (in terms of ratios).

Resonance $n$ (1, 2, 3, 4, 5,...)	OPEN tube		CLOSED tube	
	Node like ratio to tube length	Antinode like ratio to tube length	Node like ratio to tube length	Antinode like ratio to tube length
1	0	1	1	1/2
2	0	1/3	1/2	1/4
2	2/3	1	1	3/4
3	0	1/5	1/3	1/6
3	2/5	3/5	2/3	1/2
3	4/5	1	1	5/6
4	0	1/7	1/4	1/8
4	2/7	3/7	1/2	3/8
4	4/7	5/7	3/4	5/8
4	6/7	1	1	7/8
5	0	1/9	1/5	1/10
5	2/9	1/3	2/5	3/10
5	4/9	5/9	3/5	1/2
5	2/3	7/9	4/5	7/10
5	8/9	1	1	9/10
6	0	1/11	1/6	1/12
6	2/11	3/11	1/3	1/4
6	4/11	5/11	1/2	5/12
6	6/11	7/11	2/3	7/12
6	8/11	9/11	5/6	3/4
6	10/11	1	1	11/12
7	0	1/13	1/7	1/14
7	2/13	3/13	2/7	3/14
7	4/13	5/13	3/7	5/14
7	6/13	7/13	4/7	1/2
7	8/13	9/13	5/7	9/14
7	10/13	11/13	6/7	11/14
7	12/13	1	1	13/14
8	0	1/15	1/8	1/16
8	2/15	1/5	1/4	3/16
8	4/15	1/3	3/8	5/16
8	2/5	7/15	1/2	7/16
8	8/15	3/5	5/8	9/16
8	2/3	11/15	3/4	11/16
8	4/5	13/15	7/8	13/16
8	14/15	1	1	15/16
9	0	1/17	1/9	1/18
9	2/17	3/17	2/9	1/6
9	4/17	5/17	1/3	5/18
9	6/17	7/17	4/9	7/18
9	8/17	9/17	5/9	1/2
9	10/17	11/17	2/3	11/18
9	12/17	13/17	7/9	13/18
9	14/17	15/17	8/9	5/6
9	16/17	1	1	17/18

the incident plane sinusoidal sound wave. The membrane began to oscillate after the impact sound waves reached it. This movement was picked up by the high-speed digital camera and was displayed on the LCD screen.

In order to determine a rough estimate of the resonance frequency of the membrane, the 0–1000 Hz frequency range was studied by taking measurements at every 20 Hz. The deflection size of the nanofibrous

membranes under the frequency range of 0–1000 Hz was measured using the experimental settings below:

Setting 1: Open tube with positive tension of membrane (one end of the tube is open).

Setting 2: Closed tube with positive tension of membrane (the tube was closed with a rigid plate).

Setting 3: Open tube with negative tension of membrane (a 0.5387 g weight was hung on the sample, and then

immediately removed so as to create a radial tension on the sample while one end of the tube was left open).

Setting 4: Closed tube with negative tension of membrane (a 0.5387 g weight was hung on the sample, and then immediately removed so as to create a radial tension on the sample while the tube was closed with a rigid plate).

Four different experimental settings were used to study the resonant behavior of nanofibrous membrane under different conditions.

#### Open vs. closed method

Resonance frequency of open tube can be calculated as follows (Hirose & Lomngren, 2010):

$$f = (2n - 1) \frac{c}{4L} \quad (1)$$

and that of closed tube is given by:

$$f = n \frac{c}{2L}, \quad (2)$$

where  $n$  is 1, 2, 3, 4...,  $c$  sound velocity in the air [ $\text{m s}^{-1}$ ],  $L$  tube length [m]

The positions of the nodes/antinodes are given in Table 2. Each value in the table was the ratio of the position of a node/antinode to the total tube length, which was assumed to be 1 unit. The first three resonance frequencies occurred in experimental (modes 1–3).

Figures 4–7 show the positions of the nodes/antinodes of standing waves (see Table 2) in the empty

open and closed tube for the resonance frequencies calculated using Equations (1) and (2). In these figures, the relative position of the membrane to these nodes/antinodes is also presented by means of a red line. The position of membrane was chosen randomly at 0.637 of tube length to ensure that the membrane is not located exactly at node or antinode of tube. By placing the measured sample out of the characteristic resonant points, the basic resonant frequency of membrane should not be affected by the first resonant frequency of the tube at 139 Hz for the open tube and 277 Hz for the closed tube. The results of measurements shown in the Figures 8–11 confirm the presumption of randomly selected position of the inside the tube in all settings. The first peak of deflection belongs only to the membrane, not the tube, because the first resonant frequency is higher than the basic resonant frequency of membrane.

#### Resonance frequency dependence on area density of circular homogenous membrane

Regarding the graphs given in Figures 8–11, the first peak having the maximum deflection tended to shift toward the lower frequencies when the basis weight of the material was increased. In other words, the resonance frequency of the nanofibrous membrane was inversely proportional to the basis weight for the nanofibrous membrane, in the way given by the theory of a circular homogenous membrane. The theory is formulated as follows (Rossi, 1988; Škvor, 2001):

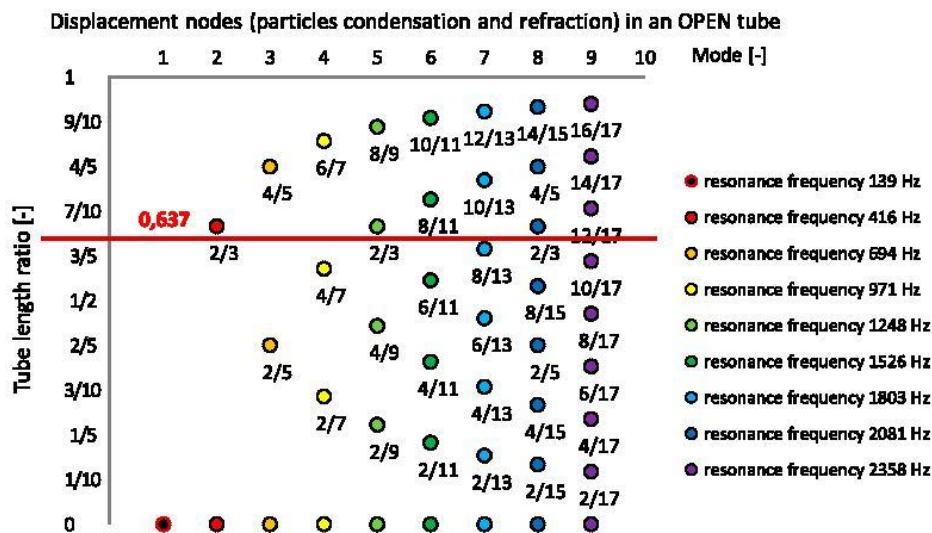


Figure 4. Positions of nodes of standing wave inside the empty OPEN tube with the line of membrane position with respect to tube length.

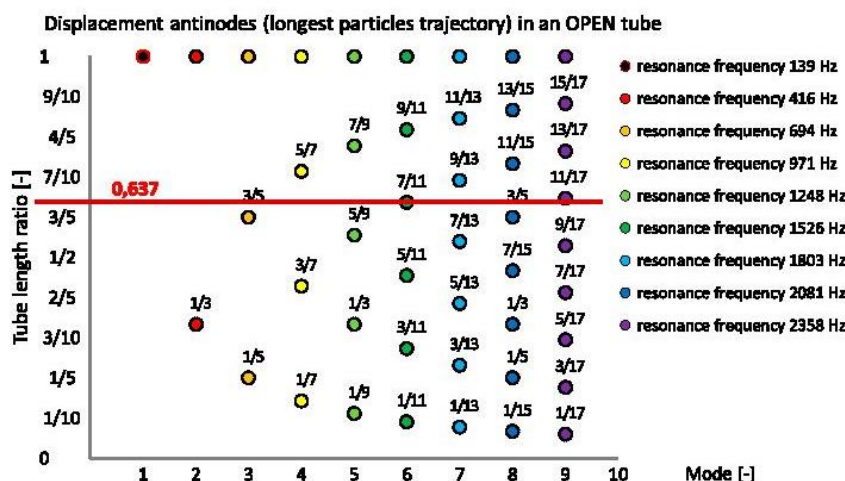


Figure 5. Positions of antinodes of standing wave inside the empty OPEN tube with the line of membrane position with respect to tube length.

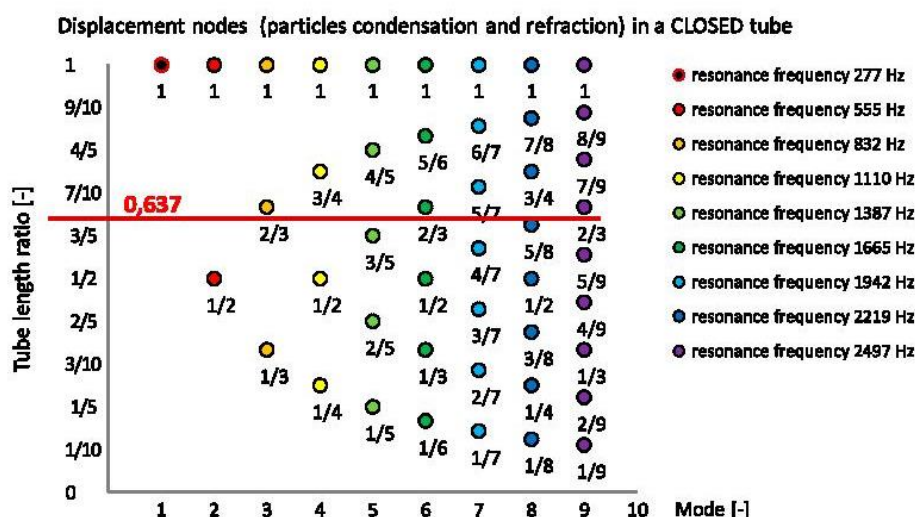


Figure 6. Positions of nodes of standing wave inside the empty CLOSED tube with the line of membrane position with respect to tube length.

$$f = \frac{a}{2\pi R} \sqrt{\frac{F}{m_{sq} 2\pi R}} \quad (3)$$

where  $F$  is the applied force to the membrane [N],  $R$  is the radius of the membrane [m],  $m_{sq}$  is the basis weight of membrane [ $\text{kg m}^{-2}$ ], and  $a$  is a constant of mode. Since these values were constant quantities for each membrane produced in this experimental study, the Equation (3) may be simplified as follows:

$$f = \frac{\text{constant}}{\sqrt{m_{sq}}} \quad (4)$$

Besides the basis weight the other parameters e.g. fiber diameter and its distribution, the flexibility of the macromolecular chains of the nanofibers, compactness of the nanofiber layer i.e. porosity and friction between individual nanofibers, anisotropy of the structure, and others influence the overall acoustic properties of the



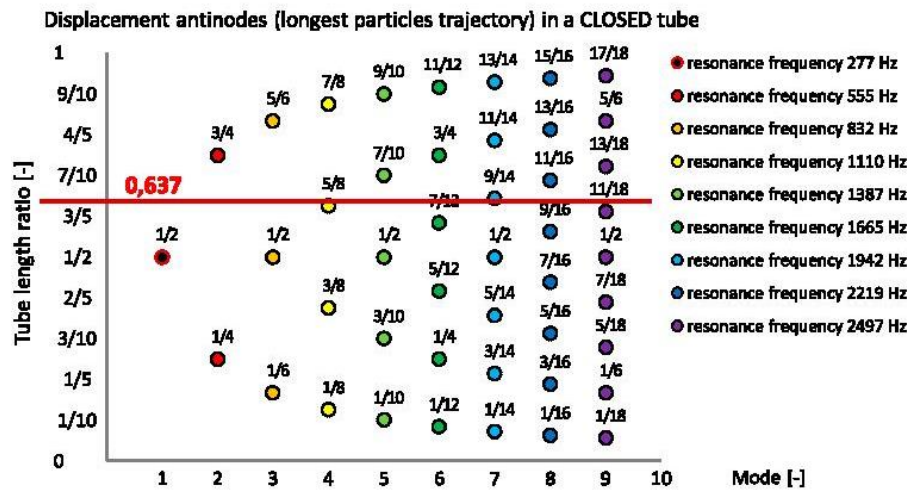


Figure 7. Positions of antinodes of standing wave inside the empty CLOSED tube with the line of membrane position with respect to tube length.

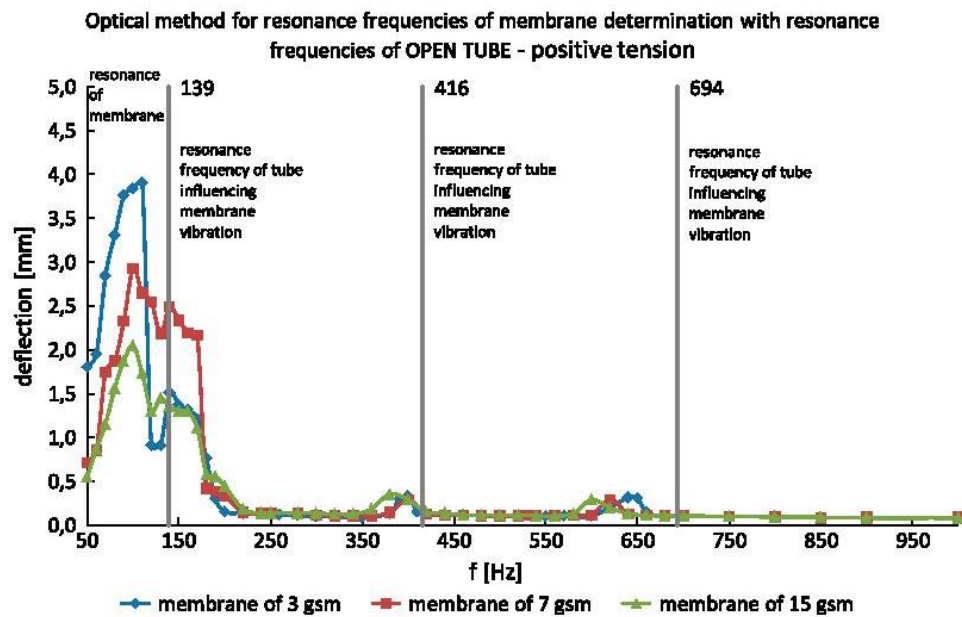


Figure 8 Deflection of membrane for setting 1.

nanofiber membrane. Some of these parameters have been studied and described in the study (Kucukali Ozturk, Nergis, Candan, & Kalinova, 2014). From the results of this study, it can be concluded that the sound absorption behavior of the nanofibrous membranes increased when the fiber diameter was decreased.

## Results and discussion

Figures 8–11 show the sum of the deflection (i.e. the sum of positive and negative amplitudes) of PVA nanofibrous membranes having different basis weights for the different measurement settings (setting 1–4). From these figures, it can be seen that the amplitude of the membrane under

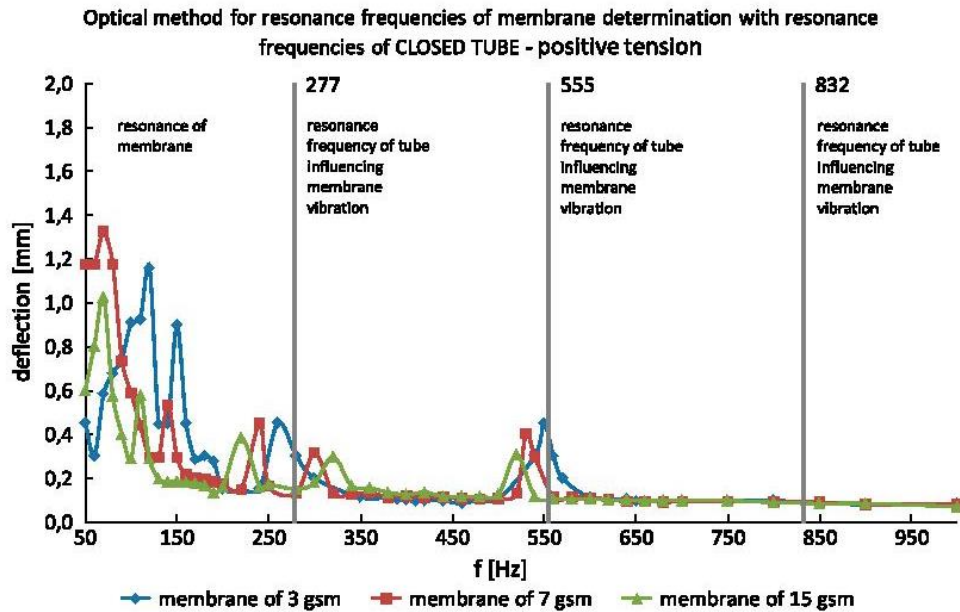


Figure 9. Deflection of membrane for setting 2.

positive tension (without a weight) was different from that of the membrane under negative tension (with a weight). Inside a closed tube, the standing wave occurs due to the reflection of the wave from back wall with an antinode of the first resonance frequency of 277 Hz, which is close to the membrane position (see Figure 7). Therefore, the

antinode of the first resonance frequency inside the closed tube is expected to impact the membrane vibration. On the other hand, the positions of the node inside the closed tube and node and antinode inside the open tube are far away from the membrane position (e.g. 1 or 0 which is far from 0.637) (see Figures 4–6).

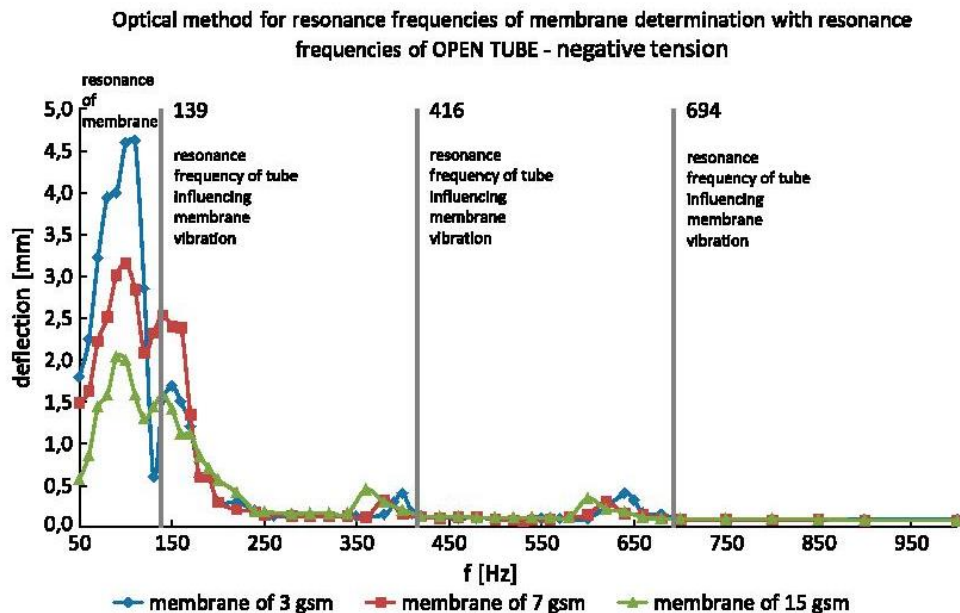


Figure 10. Deflection of membrane for setting 3.

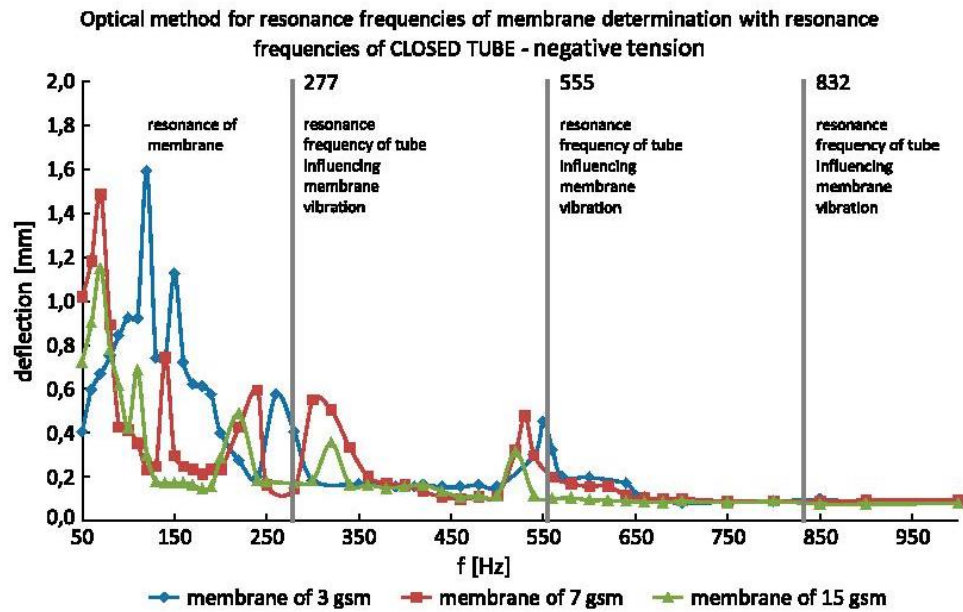


Figure 11. Deflection of membrane for setting 4.

Figure 8 shows the comparison of the resonance frequency of the nanofibrous membranes in the open tube form (i.e. setting 1). As may be seen from the graph, the resonance frequencies of the membrane decreased as basis weight of the nanofibrous membrane increased. This was more evident at higher resonance frequencies. Except for the first resonance peak, the resonance behavior of the membrane seemed to be affected by the resonance of the tube itself. This finding was supported by the fact that the resonance frequencies of the tube (gray lines) were close to those of the membranes (the colored peaks).

Figure 9 shows the resonance frequencies of the membranes in the case of closed tube. The resonance frequencies of the nanofibrous membranes shifted to the lower frequencies as the basis weight of the membranes increased, which was in accordance with the results of setting 1. Also, more peaks occurred at high frequencies.

This can be attributed to the fact that the antinodes inside the closed tube impacted the membrane vibration.

Finally, with reference to Figure 10 and Figure 11, it can be stated that the resonance frequencies of the membranes exhibited similar characteristics to those presented in Figures 8 and 9, respectively. However, the amount of deflection in general was observed to increase in the case of negative tensioning of the membranes (settings 3 and 4). Application of tension to the samples might have rendered them slack and more flexible, and consequently, they might have vibrated more readily at a wider displacement.

Besides all these, the amplitude of the deflections was observed to decrease when the tube was closed. The reason may be explained with that the resonance frequency occurs when the deflection is at a maximum. When the tube is closed, its resonance frequency does not match up with that of the membrane, and therefore,

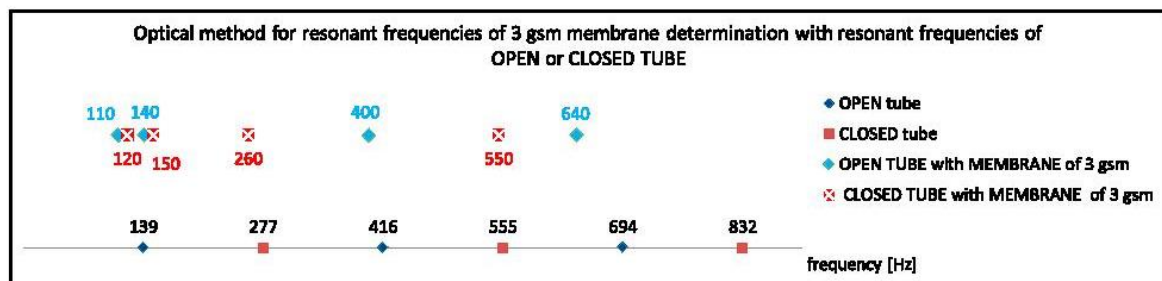


Figure 12. The resonance frequencies of  $3 \text{ g m}^{-2}$  membrane against those of the empty tube.



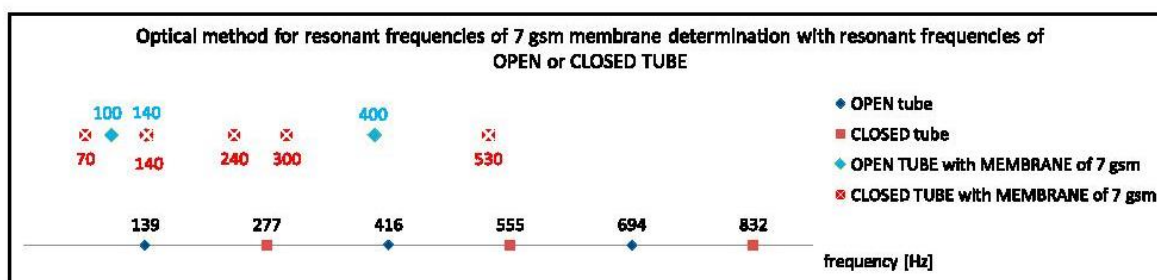


Figure 13. The resonance frequencies of 7 g m<sup>-2</sup> membrane against those of the empty tube.

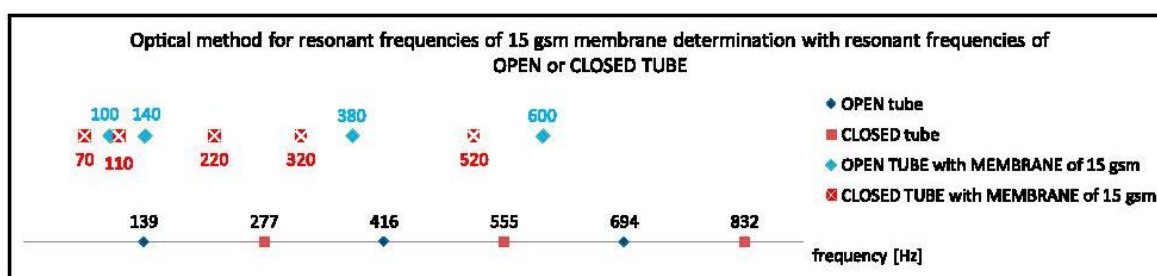


Figure 14. The resonance frequencies of 15 g m<sup>-2</sup> membrane against those of the empty tube.

the membrane cannot vibrate sufficiently to cause maximum deflection to occur.

In an attempt to demonstrate the relation between resonance frequencies of the membrane and the tube for each basis weight, Figures 12–14 were plotted. The influence of the resonance frequency of the tube on the resonance frequencies of the samples may not be negligible for the measurements made for light membrane. In the case of the lightest membrane, the resonance frequencies of the sample almost coincided with those of the tube, which confirmed the influence of the tube. This may be due to the fact that the tube causes the formation of a standing wave in which the node and antinode locations of the light weight membrane vibrations change, and hence, samples resonance frequencies matched up with those of the tube as expected. However, as was expected, it was not as evident for heavier membranes. Heavy membranes show their own characteristic and were less affected by the tube.

## Conclusions

A novel method for the determination of the resonance frequency of a membrane was developed within the frame of a long-term project. In this article, the effect of basis weight of a membrane on resonance frequency was investigated for four different settings such as open tube, negative pre-tensioning, etc. using this optical method. It

was found that the resonance frequencies of the membranes decreased as basis weight of the samples increased. This result is in the accordance with behavior of other types of fiber-based acoustic absorbing materials. The main difference between using the nanofibrous membranes and conventional fibrous materials is in the absorbance of lower frequencies. This effect is caused by the morphology parameters e.g. ratio between free length of fiber between entanglements. Furthermore, the deflection size of the membranes also decreased with the increase of the basis weight. Finally, it was concluded that except for the lowest frequencies (first resonant peak), the resonance behavior of the membrane was affected by the resonance of the tube. Heavy membranes show their own characteristic and were less affected by the tube.

## Acknowledgement

The results of this project LO1201 were obtained through the financial support of the Ministry of Education, Youth and Sports in the framework of the targeted support of the “National Programme for Sustainability I” and the OPR&DI Project Centre for Nanomaterials, Advanced Technologies and Innovation CZ.1.05/2.1.00/01.0005. The authors do also thank TUBITAK for its support to the project in the frame of “TUBITAK 2214 Program”.

## Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the authors.

## References

- Filová, E., Rampichová, M., Litvinec, A., Držík, M., Micková, A., Buzgo, M., ... Amler, E. (2013). A cell-free nanofiber composite scaffold regenerated osteochondral defects in miniature pigs. *International Journal of Pharmaceutics*, 447, 139–149.
- Hirose, A., & Lonngren, K. E. (2010). *Fundamentals of Wave Phenomena* (2nd ed.). Raleigh: SciTech Publishing. ISBN: 978-1-891121-92-0.
- Huang, X. Y., Nguyen, N. T., & Jiao, Z. J. (2007). Nonlinear standing waves in a resonator with feedback control. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 122, 38–41.
- Inwald, E. C., Döllinger, M., Schuster, M., Eysholdt, U., & Bohr, C. (2011). Multiparametric analysis of vocal fold vibrations in healthy and disordered voices in high-speed imaging. *Journal of Voice*, 25, 576–590.
- Jirsak, O., Kalinova, K., & Stranska, D. (2006). *Nanofibre technologies and nanospider applications*. Nanofair 2006, 5th International Nanotechnology Symposium, Karlsruhe, ISSN 0083-5560, ISBN 3-18-091940-X.
- Jirsak, O., Sanetnik, F., Lukas, D., Kotek, V., Martinova, L., & Chaloupek, J. (2006). Method of nanofibres production from a polymer solution using electrostatic spinning and a device for carrying out the method, WO2005024101 (US2006290031).
- Kalinová, K. (2011). Nanofibrous resonant membrane for acoustic applications. *Journal of Nanomaterials*, 2011, 6 pages. doi:10.1155/2011/265720
- Kucukali Ozturk M., Nergis B. U., Candan C., & Kalinova, K. (2014). *A study on the effect of fiber diameter on the acoustic behavior of the nanofibrous membrane*. The Fiber Society Spring 2014 International Conference – Regional Research Library-Liberec City Center, May 21–23, 2014 Liberec, Czech Republic.
- Mohrova, J., & Kalinová K. (2012). Different structures of PVA nanofibrous membrane for sound absorption application. *Journal of Nanomaterials*, 2012, issue: Nanofiber Manufacture, Properties and Applications (NFMPA), 4 pages.
- Nabavi, M., Siddiqui, K., & Dargahi, J. (2008). Measurement of the acoustic velocity field of nonlinear standing waves using the synchronized PIV technique. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33, 123–131.
- Onen, O., & Caliskan, M. (2010). Design of a single layer micro-perforated sound absorber by finite element analysis. *Applied Acoustics*, 71, 79–85.
- Ozturk M. K., Kalinova K., Nergis B., & Candan C. (2013). Comparison of resonant frequency of nanofibrous membrane and homogenous membrane structure. *Textile Research Journal*, 83, 2204–2210. doi:10.1177/0040517513490064
- Rossi, M. (1988). *Acoustics and Electroacoustics*. ISBN-10: 0890062552. Artech House, London.
- Rothberg, S. J., Halkon, B. J., Tirabassi, M., & Pusey, C. (2012). Radial vibration measurements directly from rotors using laser vibrometry: The effects of surface roughness, instrument misalignments and pseudo-vibration. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 33, 109–131.
- Sakagami, K., Morimoto, M., & Yairi, M. (2009). A note on the relationship between the sound absorption by microperforated panels and panel/membrane-type absorbers. *Applied Acoustics*, 70, 1131–1136.
- Škvor, Z. (2001). *Akustika a elektroakustika* [Acoustics and Electroacoustics]. Academia Praha, ISBN 80-200-0461-0.
- Švec, J. G., & Schutte, H. K. (1996). Videokymography: High-speed line scanning of vocal fold vibration. *Journal of Voice*, 10, 201–205.
- Tatar, K., & Gren, P. (2008). Measurement of milling tool vibrations during cutting using laser vibrometry. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48, 380–387.
- Verma, N. K., & Kumar, S. (2006). Laser based optical sensor for vibration measurements. *NDT&E International*, 39, 106–108.
- Wang, W., Mottershead, J. E., Ihle, A., Siebert, T., & Reinhard Schubach, H. (2011). Finite element model updating from full-field vibration measurement using digital image correlation. *Journal of Sound and Vibration*, 330, 1599–1620.



## KAPITOLA II: SYNERGIE DVOU RŮZNÝCH REZONANČNÍCH PRVKŮ V JEDNOM AKUSTICKÉM SYSTÉMU.

V tomto uspořádání je myšlenkou spojení membránového (nanovlákného) rezonátoru spolu s dutinovým rezonátorem, resp. perforovaným panelem. Princip je popsán v úvodní kapitole U.2., resp. U.2.1. Rezonanční frekvence homogenní kruhové membrány  $f_{0,i}$  [Hz] je dle práce [Škvor, 2001] dána vztahem

$$f_{0,i} = \frac{1}{2\pi R} a_{0,i} C_M, \quad (2)$$

kde  $R$  je poloměr kruhu napnuté membrány [m],  $a_{0,i}$  je konstanta vidu (2,4048 pro  $f_{0,1}$ ; 5,5201 pro  $f_{0,2}$ ; 8,6537 pro  $f_{0,3}$ ; 11,97915 pro  $f_{0,4}$ ) a  $C_M$  je rychlost příčné vlny šířící se na membráně [ $\text{m.s}^{-1}$ ] dána vztahem

$$C_M = \sqrt{\frac{v}{m_{sq}}}, \quad (3)$$

kde  $v$  je radiální napětí membrány [ $\text{N.m}^{-1}$ ] a  $m_{sq}$  plošná hmotnost membrány [ $\text{kg.m}^{-2}$ ].

Pro pravoúhlou membránu jsou pak její rezonanční frekvence  $f_{m,n}$  [Hz] dle práce [Škvor, 2001] dány vztahem

$$f_{m,n} = \frac{1}{2} C_M \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}, \quad (4)$$

kde  $m, n$  jsou vidy v každé ose,  $a, b$  jsou rozměry stran pravoúhelníku [m].

Uzlové čáry kruhu v nejjednodušším případě symetrie jsou soustředné kružnice, uzlové čáry pravoúhelníku směřují v nejjednodušším případě ve směru os napětí membrány (kolmo na strany tvaru) a rozdělují pravoúhelník na stejné díly v jednom ze směrů, nebo v obou směrech. Ve složitějším případě, je uzlová čára vedena po úhlopříčce pravoúhelníku. Z tohoto důvodu byly k daným hodnotám rezonanční frekvence kruhu odvozeny tři varianty rozměru pravoúhelníku (pro zjednodušení čtverce) a vypočítány jejich rezonanční frekvence (tabulka 1). Konstantního napnutí membrány v bylo dosaženo dodržením konstantních podmínek laminace nanovlákné membrány na desku s perforací. Optickou metodou byla stanovena základní rezonanční frekvence kruhové membrány  $f_{0,1}$ . Za předpokladu konstantní hodnoty  $v$  a tím i  $C_M$  pak vztah (4) lze upravit dosazením vztahu (2) následovně

$$f_{m,n} = \frac{\pi R f_{0,i} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}}{a_{0,i}}. \quad (5)$$

První varianta rozměru čtverce vychází ze shodné plochy s plochou kruhu ( $1,27 \cdot 10^{-3} \text{m}^2$ ), pak je strana čtverce rovna 0,036m. Druhá varianta je odvozena od shodného rozměru strany čtverce s průměrem kruhu 0,04m a třetí varianta počítá se shodou rozměru průměru kruhu a úhlopříčky čtverce  $x=0,04$  (strana čtverce

má pak rozměr 0,028m). Z hodnot rezonanční frekvence, vypočítané pro vidy  $m=1,2,3$  a  $n=1,2,3$ , je nalezena shoda s rezonančními frekvencemi kruhu pouze v první variantě, kde plochy obou útvarů jsou shodné (tabulka 1 (a), (b)). Proto byl návrh experimentu založen na shodné ploše útvarů. V ostatních variantách rozměru čtverce, kde se s průměrem kruhu shoduje buď strana, nebo úhlopříčka čtverce, neodpovídají žádné rezonanční frekvence vlastním frekvencím kruhu.

KRUH 40		R [m]	$f_{0,i}$ [Hz]
a0,1	2,4048	0,02	<b>90</b>
a0,2	5,5201	0,02	<b>207</b>
a0,3	8,6537	0,02	<b>324</b>
a0,4	11,7915	0,02	<b>441</b>

(a)

ČTVEREC 36;36				a [m]	b [m]	$f_{m,n}$ [Hz]
m	1	n	1	0,036	0,036	<b>92</b>
m	1	n	2	0,036	0,036	<b>146</b>
m	2	n	1	0,036	0,036	<b>146</b>
m	2	n	2	0,036	0,036	<b>185</b>
m	3	n	1	0,036	0,036	<b>207</b>
m	1	n	3	0,036	0,036	<b>207</b>
m	3	n	2	0,036	0,036	<b>236</b>
m	2	n	3	0,036	0,036	<b>236</b>
m	3	n	3	0,036	0,036	<b>277</b>

(b)

ČTVEREC 40;40				a [m]	b [m]	$f_{m,n}$ [Hz]
m	1	n	1	0,040	0,040	<b>83</b>
m	1	n	2	0,040	0,040	<b>131</b>
m	2	n	1	0,040	0,040	<b>131</b>
m	2	n	2	0,040	0,040	<b>166</b>
m	3	n	1	0,040	0,040	<b>186</b>
m	1	n	3	0,040	0,040	<b>186</b>
m	3	n	2	0,040	0,040	<b>212</b>
m	2	n	3	0,040	0,040	<b>212</b>
m	3	n	3	0,040	0,040	<b>249</b>

(c)

ČTVEREC 28;28 ( $x=40$ )				a [m]	b [m]	$f_{m,n}$ [Hz]
m1	1	n1	1	0,028	0,028	<b>118</b>
m1	1	n2	2	0,028	0,028	<b>186</b>
m2	2	n1	1	0,028	0,028	<b>186</b>
m2	2	n2	2	0,028	0,028	<b>235</b>
m3	3	n1	1	0,028	0,028	<b>263</b>
m1	1	n3	3	0,028	0,028	<b>263</b>
m3	3	n2	2	0,028	0,028	<b>300</b>
m2	2	n3	3	0,028	0,028	<b>300</b>
m3	3	n3	3	0,028	0,028	<b>353</b>

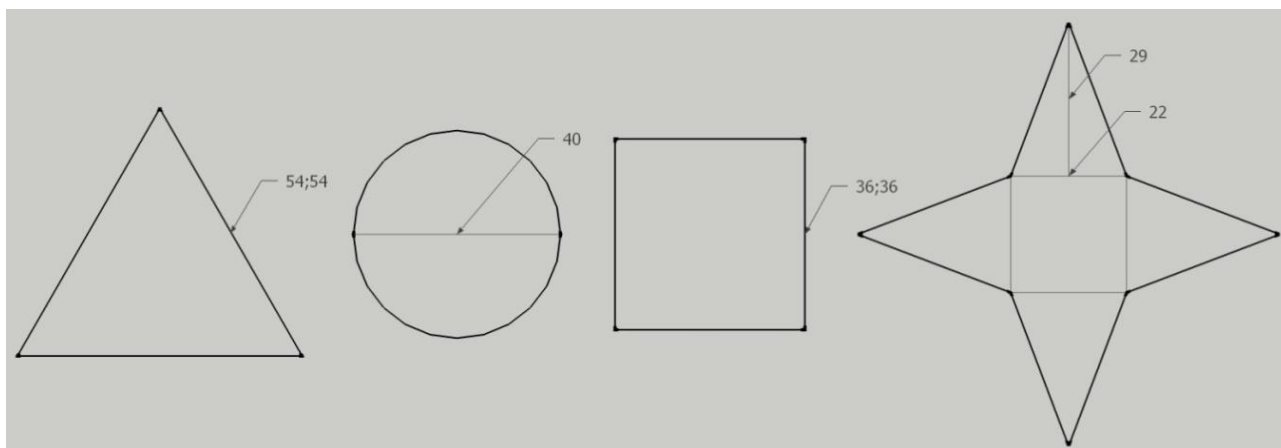
(d)

Tabulka1: výpočet rezonančních frekvencí (a) kruhu o průměru 0,04m; čtverce o variantním rozměru strany – (b) 0,036m (shodná plocha s kruhem =  $1,27 \cdot 10^{-3} \text{m}^2$ ), (c) 0,04m (shodná strana s průměrem kruhu), (d) 0,028m (úhlopříčka  $x=0,04$  shodná s průměrem kruhu).

Pro ověření vlivu tvaru perforace na rezonanční chování akustického prvku s nanovláknennou membránou byly navrženy různé tvary perforace při konstantní ploše útvaru  $1,27 \cdot 10^{-3} \text{m}^2$  – kruh, čtverec, trojúhelník a čtyřcípá hvězda (tabulka 2, obraz 35). Na PA6 desku o tloušťce 13mm s jedním vystředěným otvorem různého tvaru byla laminována nanovláknenná vrstva z 14% roztoku PA6 o plošné hmotnosti 0,2gsm. Je zřejmé, že rezonance nanovláknenné membrány má pro akustický systém (dutinový/membránový rezonátor) majoritní vliv na výsledné vlastnosti.

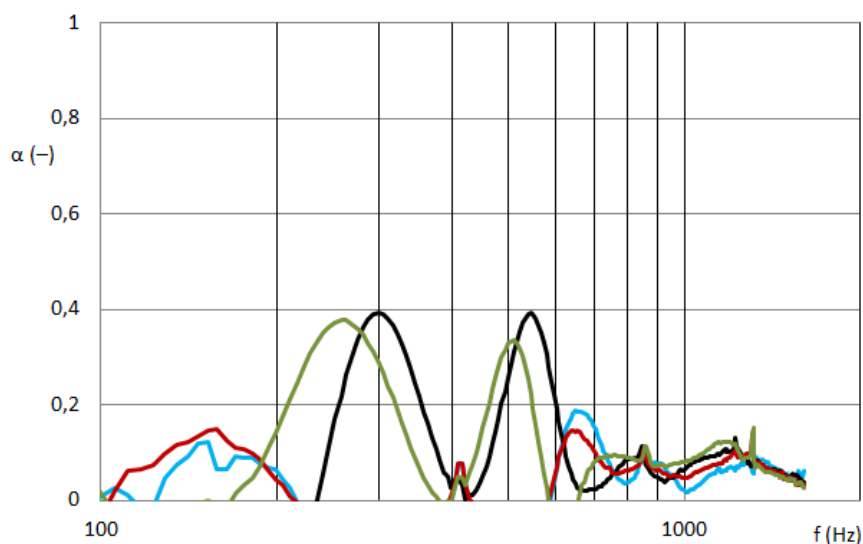
Tvar	rozměry			Tvar	rozměry		
trojúhelník rovnostranný	strana [m]	výška [m]	plocha [m <sup>2</sup> ]	trojúhelník rovnostranný	strana [m]	výška [m]	plocha [m <sup>2</sup> ]
	0,054	0,046765	0,001263		0,068	0,058890	0,002002
kruh	průměr [m]		plocha [m <sup>2</sup> ]	kruh	průměr [m]		plocha [m <sup>2</sup> ]
	0,04		0,001257		0,08		0,005027
čtverec	strana [m]		plocha [m <sup>2</sup> ]	čtverec	strana [m]		plocha [m <sup>2</sup> ]
	0,036		0,001296		0,056		0,003136
hvězda				hvězda			
cíp	základna [m]	výška [m]	plocha [m <sup>2</sup> ]	cíp	základna [m]	výška [m]	plocha [m <sup>2</sup> ]
	0,022	0,029	0,000319		0,029	0,039	0,000566
4*cíp			0,001276	4*cíp			0,002262
čtverec	strana [m]		plocha [m <sup>2</sup> ]	čtverec	strana [m]		plocha [m <sup>2</sup> ]
	0,022		0,000484		0,029		0,000841
celkem			0,001760	celkem			0,003103

Tabulka2: výpočet plochy perforace ve tvaru rovnostranného trojúhelníku, kruhu, čtverce a hvězdy o jednotné ploše (modrá pole), variantní rozměry tvarů jsou vyznačeny zeleně.

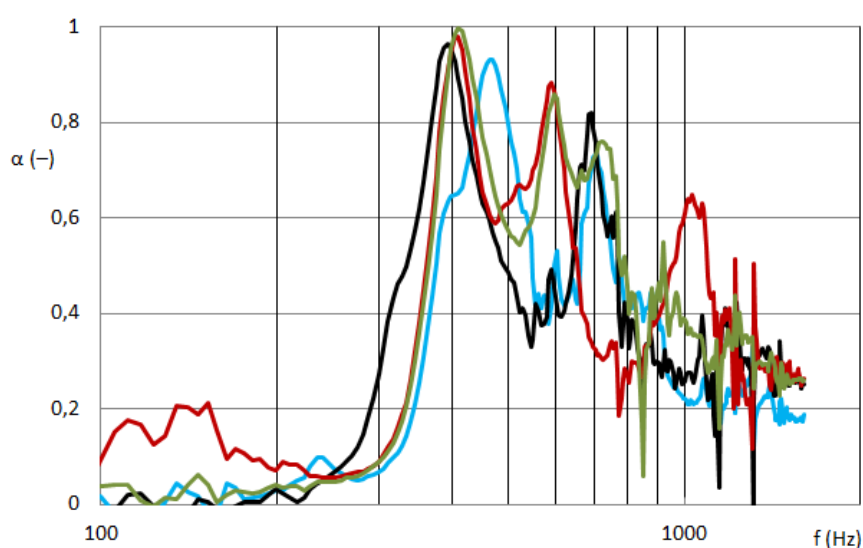


Obrázek 35: znázornění základních tvarů perforace o stejné ploše  $1,27 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ .

Do systému vstupuje dutinový rezonátor o konstantní ploše perforace, avšak rozdílném tvaru se zanedbatelnou výslednou pohltivostí zvuku (obrázek 36). S rozdílným tvarem, má akustický systém s aplikovanou nanovláknennou membránou, která překrývá otvor dutiny ve výsledku různá rezonanční maxima činitele zvukové pohltivosti, avšak první maximum čtverce a trojúhelníku je téměř shodné při cca 400Hz (obrázek 37) a podobně se shoduje druhý peak čtverce a kruhu při cca 700Hz (obrázek 38). Membrána ve tvaru čtyřcípé hvězdy pak rezonuje shodně s čtvercem a trojúhelníkem s prvním maximum při cca 400Hz, dále s trojúhelníkem při druhé rezonanční frekvenci cca 600Hz a nakonec její třetí rezonanční maximum odpovídá tomu druhému peaku čtverce a kruhu při cca 700Hz (obrázek 37). Obecně, čím složitější tvar, tím dochází k většímu počtu rezonancí a zvuk je tak pohlcován v širším frekvenčním spektru.

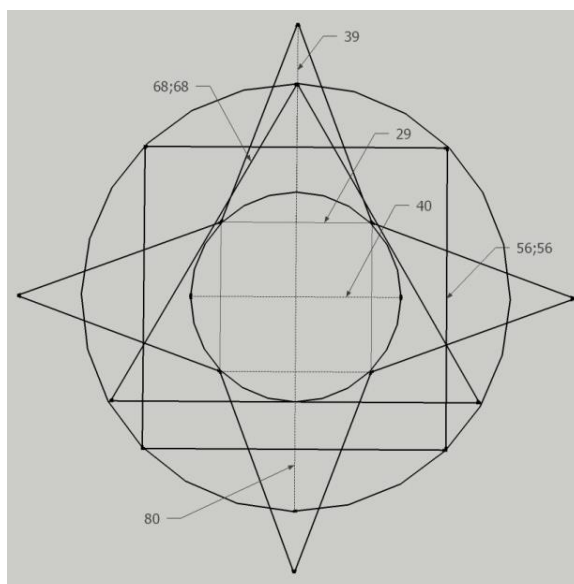


Obraz 36: frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti; deska o tloušťce 13mm s 1 vystředěným kruhovým otvorem různého tvaru a různém průměru, měřeno ve vzdálenosti 50mm od stěny; KŘIVKY: černá - čtverec strana 36mm\_50mm; červená - rovnostranný trojúhelník strana 54mm\_50mm; modrá - kruh o průměru 40mm\_50mm, zelená - hvězda o rozměru cípu 29x22 mm (výškaxstrana)\_50mm.



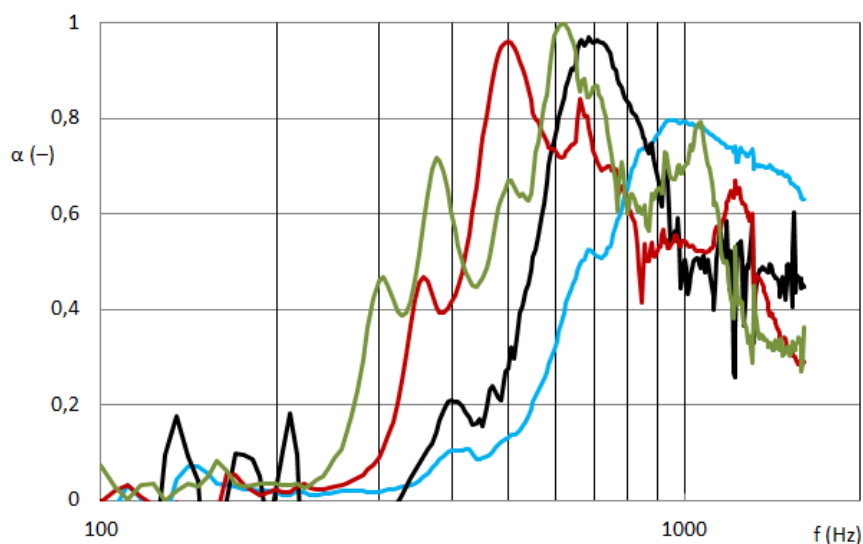
Obraz 37: frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti; Nanovrstva na nosiči (14%PA6, 0,2gsm) laminována na PA6 desku o tloušťce 13mm s 1 vystředěným otvorem různého tvaru s konstantní plochou  $1,27 \cdot 10^{-3} \text{m}^2$ , měřeno ve vzdálenosti 50mm od stěny; KŘIVKY: černá - čtverec strana 36mm; červená - rovnostranný trojúhelník strana 54mm; modrá - kruh o průměru 40mm, zelená - hvězda o rozměru cípu 29x22 mm (výškaxzákladna).

K základním tvarům byly poté odvozeny další velikosti (obraz 38) a to následovně: základní kruh o průměru 0,04m byl vepsán do rovnostranného trojúhelníku o velikosti strany 0,068m a jemu opsána kružnice o průměru 0,08m, která opisuje také čtverec o straně 0,056m. základní kružnice 0,04m je vepsána také do nového rozměru hvězdy o výšce cípu 0,039 a základny cípu 0,029m.



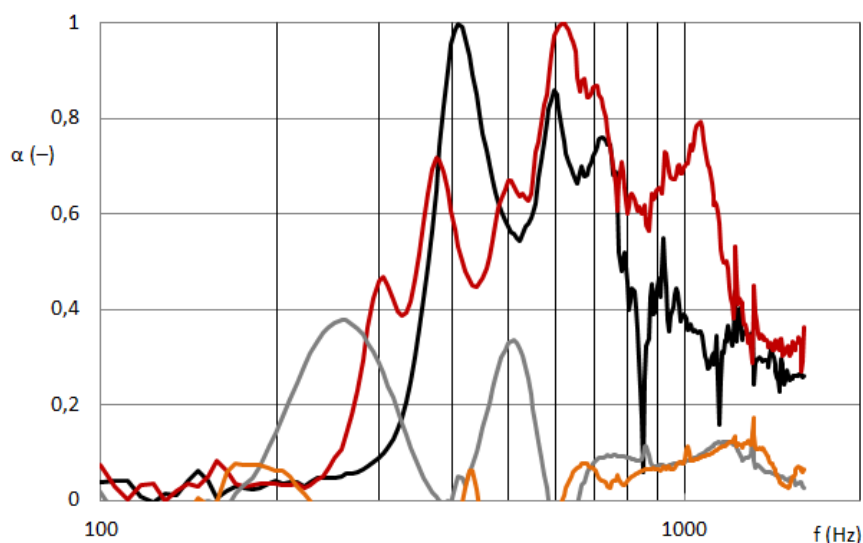
Obraz 38: znázornění dalších tvarů perforace ve vzájemném vztahu k základnímu tvaru kruhu o průměru 0,04m.

Obraz 39 porovnává dle nákresu 36 další velikosti tvarů ve vzájemném vztahu k základním tvarům. Čím složitější tvar, tím více rezonancí membrána vykazuje, tím se také pohlcuje zvuk v širší škále. Hlavní rezonanční peak každého tvaru, při kterém je pohltivost maximální, se s plochou tvaru posouvá směrem k vyšším frekvencím. Červený trojúhelník o ploše  $2,00 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$  má maximum při cca 500Hz, zelená hvězda o ploše  $3,10 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$  má maximum při cca 600Hz, černý čtverec o ploše  $3,13 \text{ m}^2$  má maximum při cca 700Hz a modrý kruh o ploše  $5,02 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$  má pak maximum při cca 900Hz.

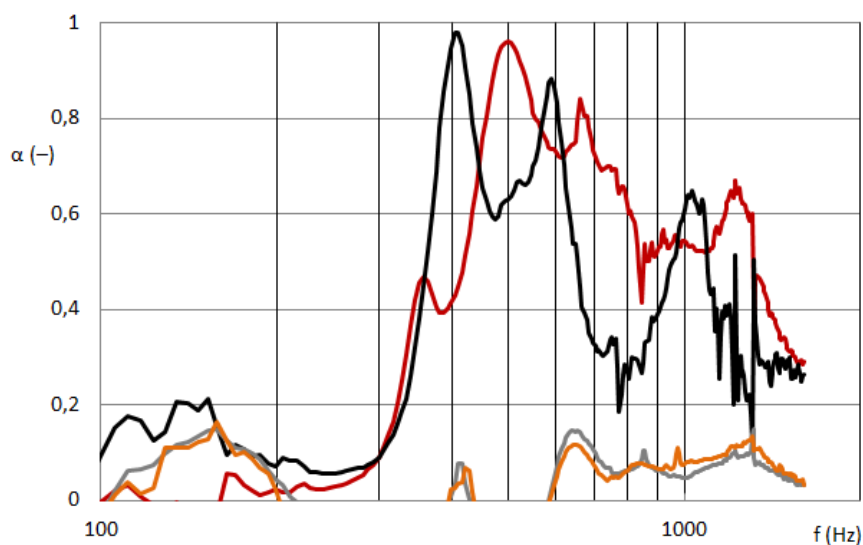


Obrázek 39: frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti; Nanovrstva na nosiči (14%PA6, 0,2gsm) laminována na PA6 desku o tloušťce 13mm s 1 vystředěným otvorem různého tvaru, měřeno ve vzdálenosti 50mm od stěny; KŘIVKY: černá - čtverec strana 56mm; červená - rovnostranný trojúhelník strana 68mm; žlutá - kruh o průměru 80mm; zelená - hvězda o rozměru cípu 39x29 mm (výškaxzákladna).

Obrazy 40 – 43 pak porovnávají různé velikosti jednoho tvaru s a bez aplikované nanovlákněné membrány (černá křivka je vždy perforace s membránou o menší ploše a k tomu šedá bez membrány, červená je perforace s membránou o větší ploše a k tomu oranžová bez membrány). Obecně lze konstatovat, že přes perforaci aplikovaná nanovlákněná membrána posouvá hlavní rezonanční peak, kdy je pohltivost zvuku maximální směrem k vyšším frekvencím oproti stejné perforaci bez membrány, avšak celková pohltivost prvku výrazně stoupne. S velikostí perforace stejného tvaru jsou v maxima pohltivosti posunuta směrem k vyšším frekvencím zvuku. Tato závislost bude jistě platit jen v určitém rozmezí velikostí, nalezení limitů nebylo předmětem tohoto experimentu.

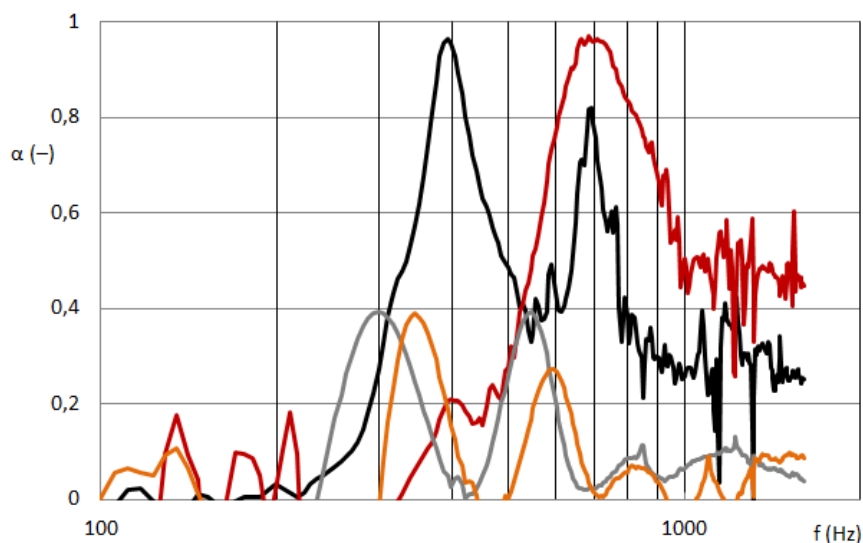


Obraz 40: frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti; Nanovrstva na nosiči (14%PA6, 0,2gsm) laminována na PA6 desku o tloušťce 13mm s 1 vystředěným otvorem tvaru čtyřcípé hvězdy o různém rozměru cípu (výška x základna), měřeno ve vzdálenosti 50mm od stěny; KŘIVKY: černá - 29x22 mm s nano 02gsm; červená - 39x29mm s nano 02gsm; šedá - 29x22 mm; oranžová - strana 39x29mm.

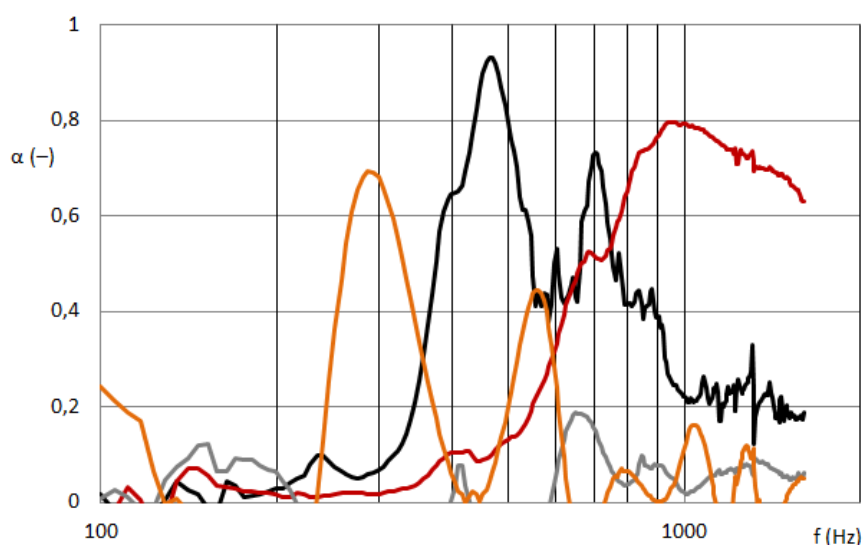


Obraz 41: frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti; Nanovrstva na nosiči (14%PA6, 0,2gsm) laminována na PA6 desku o tloušťce 13mm s 1 vystředěným otvorem tvaru rovnostranného trojúhelníku o různém rozměru strany,

měřeno ve vzdálenosti 50mm od stěny; KŘIVKY: černá - 54mm s nano 02gsm; červená - 68mm s nano 02gsm; šedá - 54mm; oranžová - strana 68mm.

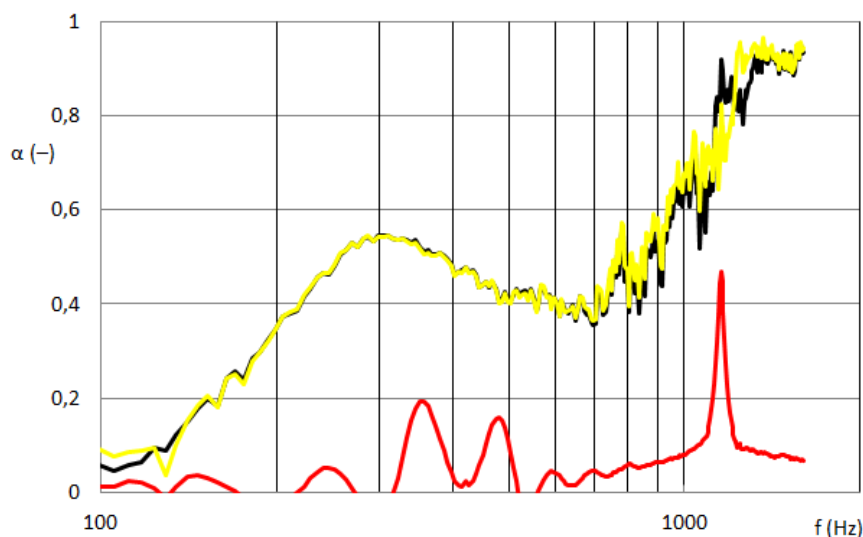


Obraz 42: frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti; Nanovrstva na nosiči (14%PA6, 0,2gsm) laminována na PA6 desku o tloušťce 13mm s 1 vystředěným otvorem tvaru čtverce o různém rozměru strany, měřeno ve vzdálenosti 50mm od stěny; KŘIVKY: černá - 36mm s nano 02gsm; červená - 56mm s nano 02gsm; šedá - 36mm; oranžová - strana 56mm.



Obraz 43: frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti; Nanovrstva na nosiči (14%PA6, 0,2gsm) laminována na PA6 desku o tloušťce 13mm s 1 vystředěným otvorem tvaru kruhu o různém rozměru strany, měřeno ve vzdálenosti 50mm od stěny; KŘIVKY: černá - 40mm s nano 02gsm; červená - 80mm s nano 02gsm; šedá - 40mm; oranžová - strana 80mm.

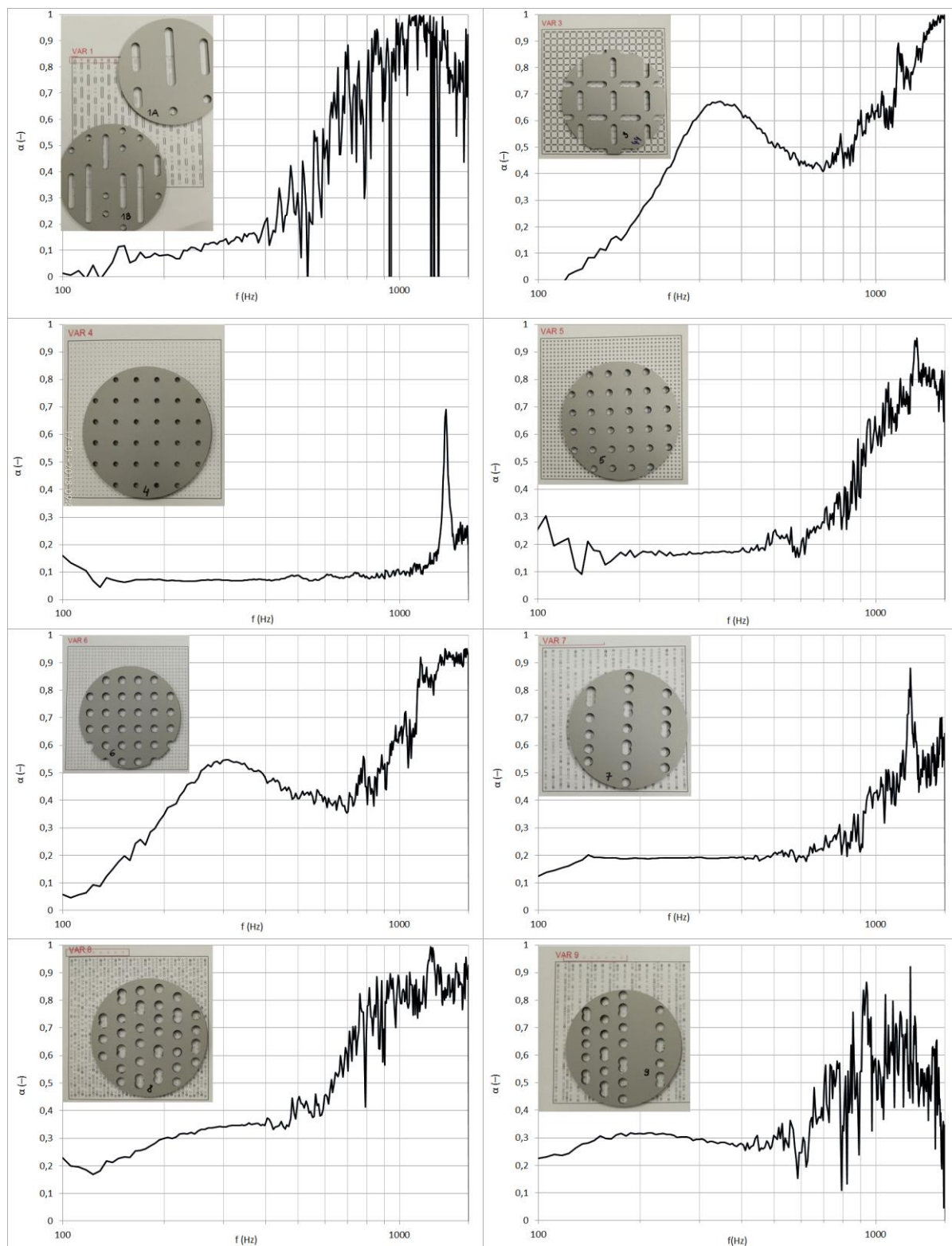
Za účelem návrhu vzoru perforace panelu, byly navrženy a testovány takové tvary, aby produkt byl snadno a rychle vyrobitelný. Proto byly použity pouze kruhové perforace a šěrbinové prořezy. Obraz 44 porovnává výsledky činitele zvukové pohltivosti desky o tloušťce 2mm perforované kruhovými otvory o průměru 8mm a rozteči 16; 16mm, jednak samotné perforované desky a poté s aplikovanou nanovláknennou vrstvou, měřeno z jedné, nebo druhé strany desky, která je vždy ve vzdálenosti 50mm od stěny/pístu trubice (vzduchová mezera mezi akustickým prvkem a odrazivou stěnou je tedy vždy 48mm).



Obraz 44: frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti; Nanovrstva na nosiči (14%PA6, 0,2gsm) laminována na BOND desku o tloušťce 2mm perforovanou kruhovými otvory o průměru 8mm a rozteči 16 x 16mm, měřeno ve vzdálenosti 50mm od stěny; KŘIVKY: černá - perforovaná deska s nanovláknennou membránou na rubu; žlutá - perforovaná deska s nanovláknennou membránou na lici; červená – samotná perforovaná deska.

Obraz 45 pak znázorňuje výsledky činitele zvukové pohltivosti desky o tloušťce 2mm perforované kruhovými a šěrbinovými otvory různých velikostí a roztečí a aplikovanou nanovláknennou vrstvou na tenkém nosiči. Z těchto výsledků je patrný velký vliv jak velikosti, tak rozteče perforací, které budou předmětem dalšího systematického výzkumu v následujícím období. Dalším výhledem je ověření významu vlastností dutinového rezonátoru (vztah 1 uvedený v kapitole U.2.), kde kromě velikosti, a rozteče otvoru, je podstatná také tloušťka desky a její vzdálenost od odrazivé plochy (v aplikaci stěny/stropu). Teoretické předpoklady budou ověřeny nejen pomocí křivky činitele zvukové pohltivosti, ale také pomocí měření výchylky některou z optických metod, uvedených v kapitole I.





Obraz 45: frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti; Nanovrstva na nosiči (14%PA6, 0,2gsm) laminována na BOND desku o tloušťce 2mm perforovanou kruhovými a šterbinovými otvory o různém průměru průměru a rozteči.

Následuje publikace, která se zabývá studiem akustického chování prvku sestávajícího z membránového (nanovlákného) rezonátoru a perforovaného panelu s kruhovými perforacemi různé velikosti a rozteče pro nalezení optimální varianty perforace vzhledem k nanovlákné membráně o daných parametrech.

- KALINOVÁ, K. A nanofibrous acoustic system based on the cavity/membrane resonance principle. *Textile Research Journal*. : SAGE Publications, 2016 on-line; 2018 88(6), 644-653 press. ISSN 0040-5175. <http://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0040517516685285>

Tímto tématem se dále zabývají následující publikace autorky:

- Kalinová K, Kolek, O. Zvukově pohltivý prostředek obsahující alespoň jeden dutinový rezonátor, 2013. Udělen český patent dne **15.8.2014** pod číslem **304657**, číslo přihlášky PV2013-35, priorita 18.1.2013. Zveřejněna přihláška na WIPO pod číslem: WO2014/111068A2 (A Sound Absorbing Means Containing at Least one Cavity Resonator)
- KALINOVÁ, K. Sound absorptive light comprising nanofibrous resonant membrane applicable in room acoustics. *Building Services Engineering Research and Technology (BSE)* ISSN: 0143-6244, SAGE PUBLICATIONS LTD, 1 OLIVERS YARD, 55 CITY ROAD, LONDON EC1Y 1SP, ENGLAND, **2017** DOI: 10.1177/0143624417733404
- ULRICH, T. a K. KALINOVÁ. Helmholtz resonators systems treated with the nanofibrous membrane. 24th International Congress on Sound and Vibration, ICSV **2017**; London; United Kingdom; 23 July 2017 through 27 July 2017; Code 12980. 0. vyd. London; United Kingdom: International Institute of Acoustics and Vibration, IIAV, 2017. Stránky neuvedeny (8 stránek). ISBN 978-1-906913-27-4, ISSN 2329-3675.

# A nanofibrous acoustic system based on the cavity/membrane resonance principle

Klara Kalinova

Textile Research Journal  
2018, Vol. 88(6) 644–653  
© The Author(s) 2016  
Reprints and permissions:  
sagepub.co.uk/journalsPermissions.nav  
DOI: 10.1177/0040517516685285  
journals.sagepub.com/home/trj



## Abstract

Room acoustic solutions are based on measurements of the acoustic power of the room and acoustic elements with different functions (absorption tiles, absorption ceilings, absorption bodies, diffusers, barriers). This work is focused only on absorption elements, with an emphasis on addressing lower frequencies. The goal of this research is achieved by sound absorbing means which contains a cavity resonator with a nanofibrous resonant membrane, which overlaps orifices of the cavity resonator. The design of the material is based on broadband noise. Absorption of lower frequencies is restricted to a certain extent by the final thickness of the acoustic material. A two-microphone impedance tube for determining the sound absorption coefficient was used to measure the limited frequency spectrum 100–1600 Hz. These frequencies, however, cover the area particularly focusing on middle and lower frequencies. The principle of the acoustic system consists in using combination of a cavity resonator, by which the air or other material contained in its cavities is forced into vibration upon impact of sound waves of high frequency, and a nanofibrous resonant membrane, which is forced into vibration upon impact of sound waves of low frequency. The optimal arrangement of holes inside the perforated plate, according to broadband sound absorption, has been found.

## Keywords

room acoustics, membrane, nanofibers, resonance, sound, electrostatic spinning, absorption

The design of a sound absorbing material suitable for the particular application is based on a range of frequencies of unwanted sound which are to be absorbed or damped. To absorb sounds of high frequencies, especially porous materials are used, such as melamine, polyurethane, and metal foams or non-woven fabrics made from mineral or polymeric fibers. The term sound absorption is understood to mean the irreversible transformation of sound energy into a different energy. The greatest amount of energy is consumed by the friction of vibrating air particles on the pore walls, where there is a reduction of the velocity gradient in the interlayer and an irreversible transformation of the kinetic energy of the particles into thermal energy.<sup>1</sup> However, these materials are unsuitable for absorbing sounds of lower frequencies, due to the great material thickness needed in such cases. Nanofibers produced by the electrospinning process have a large specific surface area.<sup>2</sup> Thanks to the large specific surface of fibers as well as the small pore size, the nanofibrous layers have different properties in comparison to currently-produced

porous fibrous material. In an experimental study<sup>1</sup> parameters of the acoustic wave propagation were derived. Static resistivity was determined based on measurements of the permeability of bulk fiber materials. The permeability of constantly filled materials is a function of the diameter of the fibers.

Materials based on the resonance principle can be divided into three groups: materials that act as a vibrating membrane; materials that act as a vibrating plate; and materials based on the principle of Helmholtz resonators. The base weight of the membrane has a clear effect on the resonant frequency of

Centre for Nanomaterials, Advanced Technologies and Innovations, Technical University of Liberec, Liberec, Czech Republic

## Corresponding author:

Klara Kalinova, Centre for Nanomaterials, Advanced Technologies and Innovations, Technical University of Liberec, Studentska 2, 46117 Liberec, Czech Republic.

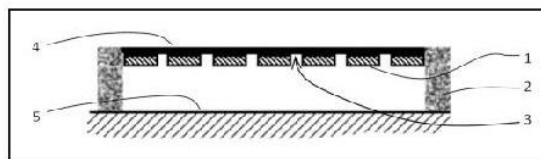
Email: klara.kalinova@tul.cz

the system or on the absorption coefficient, which increases with these characteristics.<sup>3</sup> Furthermore, there is a shift in the maximum of the sound absorption coefficient towards lower frequencies. In practice, a thin circular membrane is defined<sup>4</sup> as a form which is created by stretching, for example, a thin homogeneous elastic film with a constant base weight on a rigid circular frame. The membrane obtains its rigidity through this strain induced by the radially acting force. This section evaluates the materials which are used in room acoustics.

Sakagami et al.<sup>5</sup> shows the resonant behavior of a micro perforated panel for various perforation ratios in comparison with a panel/membrane-type absorber. The sound absorption of the back wall surface is considered. The research published by Onen et al.<sup>6</sup> compares the predictive model of sound absorption of microperforation configurations with measurements inside the impedance tube. Absorption peaks occurred at sound frequencies around 500–1000 Hz, according to perforation parameters. Kalinova<sup>7</sup> focused on estimation of the resonance frequency of nanofibrous membranes from sound absorption coefficients and transmission loss measurements, depending on the production parameters of nanofibrous membrane prepared by the electrospinning process. Kalinova, in another paper,<sup>8</sup> demonstrated that the sound absorption coefficient of the material with nanofibrous layers is, at lower frequencies, eminently higher than the base material without nanofibers. She found that the resonant nanofibrous membrane vibrates and the sound energy of lower frequencies is absorbed.

### Principle of technology

In accordance with the author's patent,<sup>9</sup> the research for this paper is based on the study of a nanofibrous membrane like the resonance membrane for an acoustic panel. The goal of this research is achieved by sound absorbing means which contains at least one cavity resonator with an acoustic resonant membrane, which overlaps an orifice/orifices leading into the cavity/cavities of the cavity resonator (see Figure 1). The parameters of the resonant membrane, together with the shape, volume, and spacing of the cavity of the cavity resonator, then determine which sound frequencies will be damped and to what extent. At the same time it is possible—while maintaining the thickness of the resonator—to damp sound frequencies which would normally be damped by a cavity resonator with an extremely large air gap. If necessary, in order to obtain the required sound absorbing properties, the resonant membrane is arranged on both opposing surfaces of the cavity resonator, and/or on the resonant membrane another cavity resonator is arranged, which



**Figure 1.** Cross section of sound absorbing means according to the invention with Helmholtz's cavity resonator covered by the membrane resonator, where 1 is the cavity resonator, 2 is the frame, 3 is the hole of the cavity resonator, 4 is the membrane resonator, and 5 is the wall/ceiling.

can be attached to another resonant membrane, which overlaps the orifice/orifices leading into its cavity/cavities. Any cavity resonator can be used as the cavity resonator, for example a Helmholtz cavity resonator, a cavity resonator formed by a honeycomb, a cavity resonator formed by a perforated panel/board with at least one cavity, and so on. Any resonant membrane can then be used as the resonant membrane, for example a layer of polymeric nanofibers, a synthetic foil, a metallic foil, a cellulose foil, a layer of paper, or a combination thereof. The resonant membrane can also be perforated. For the purpose of further increasing the sound absorption, at least one cavity of the cavity resonator is at least partially filled with sound absorbing material.

### Sound absorption of acoustic perforated boards

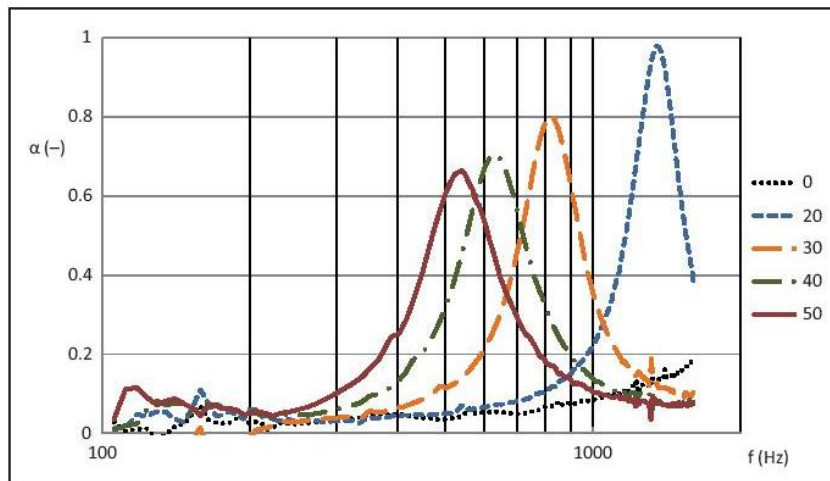
Rigid boards with circular, square, or slotted holes are used to absorb low frequencies. The major limitation of these elements is that they absorb a very narrow sound band, to which these elements are "tuned". For other frequencies the rate of absorption is very low. These boards are applied either directly to the wall/ceiling or, typically, at some distance from the wall/ceiling. They can also have a filling. Figure 2 shows the typical sound absorption curves of perforated board containing holes and slots.

## Materials and methods

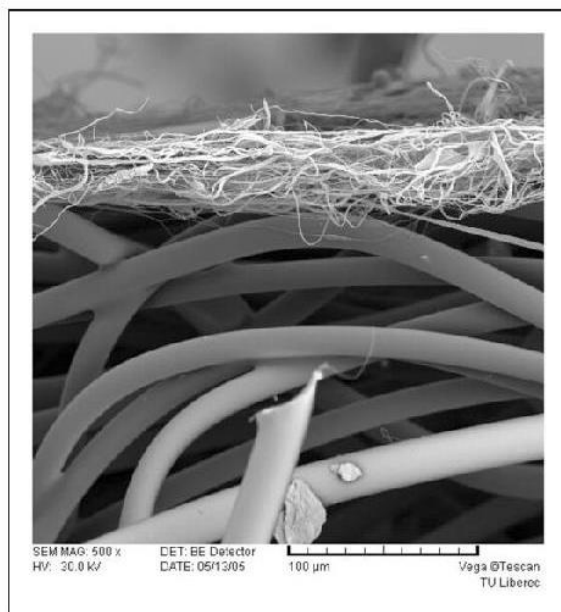
### Solutions using acoustic elements with nanofiber resonant membranes

**Resonant nanofiber membrane.** Acoustic materials with nanofiber layers have been developed for their broadband effect. The nanofiber layer works as a resonant membrane, which when exposed to sound vibrates and absorbs lower resonant frequency sound. Nanofiber layers are produced by electrospinning a polymer solution into a non-woven fabric (see Figure 3). The production of nanofiber layers by electrospinning is described in its patents.<sup>10,11</sup> Nanofiber layers have



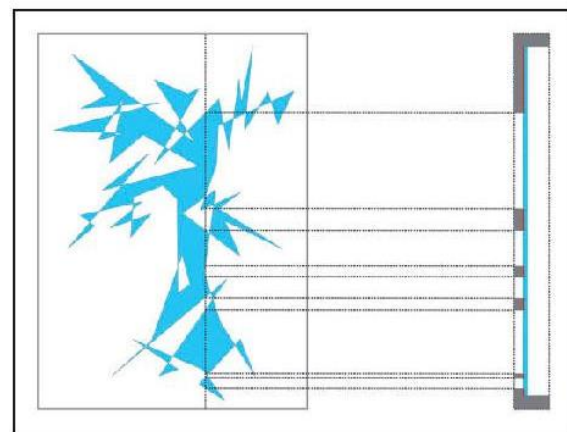


**Figure 2.** Frequency dependence of the sound absorption coefficient; rigid laminated board with a thickness of 16 mm with circular holes and slots; holes with a diameter of 8 mm and a span of 16x16 mm, slots with a thickness of 4 mm, width of 29 mm, and span of 32 mm. Measured at different distances from the wall (air gap including the thickness of the sample): 0: board on the wall; 20: 20 mm from the wall; 30: 30 mm from the wall; 40: 40 mm from the wall; 50: 50 mm from the wall.



**Figure 3.** Image of a nanofibrous structure compared to a fibrous structure.

unique acoustic properties due to the large specific surface area of the nanofibers, where viscous losses may occur, and also the ability of the nanofiber layer to resonate at its own frequency. The resonance membrane is then, upon the impact of sound waves of low frequency, brought into forced vibration, whereby the kinetic energy of the membrane is converted into thermal energy by the friction of individual nanofibers and by the friction of the membrane with the ambient air.



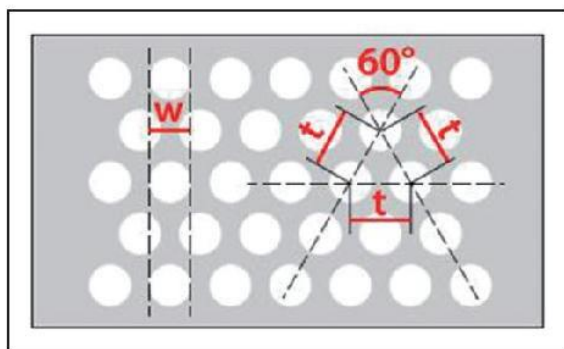
**Figure 4.** Principle of the proposed final solution of the acoustic element with a nanofiber layer, where the openings of the plate are covered by a thin carrier layer of  $25 \text{ g.m}^{-2}$ , together with a nanofiber membrane of  $0.2 \text{ g.m}^{-2}$  (blue line in the cut).

Part of the energy is also transmitted to the frame, by which means the vibrations of the resonance membrane are damped. When sound waves hit the nanofiber membrane they introduce forced vibrations in the case of resonances which have maximal amplitude. The fibrous material provides sufficient attenuation of the resonating membrane, so as much sound energy as possible is converted into heat in the resonator.

**Cavity resonator.** The acoustic element is based on a solid frame in the form of a perforated plate whose reverse side is covered by a thin spunbonded carrier layer of

$25 \text{ g.m}^{-2}$  with a nanofiber membrane of  $0.2 \text{ g.m}^{-2}$ , where the nanofiber layer is secured between the perforated plate and the carrier layer. The perforated plate is situated on the face of the acoustic panel. Figure 4 shows a possible design of acoustic panel for the purpose of illustration, and Figure 5 shows the actual design of the cavity resonator (perforated plate) used in the experiment. The  $w$  and  $t$  sizes and shapes have been chosen to ensure the greatest possible porosity of the plate.

**Cavity resonator covered by the membran.** The principle of the acoustic system consists in the usage of a combination of a cavity resonator, by which the air or other material contained in its cavities is forced into vibration upon impact of sound waves of high frequency, and an



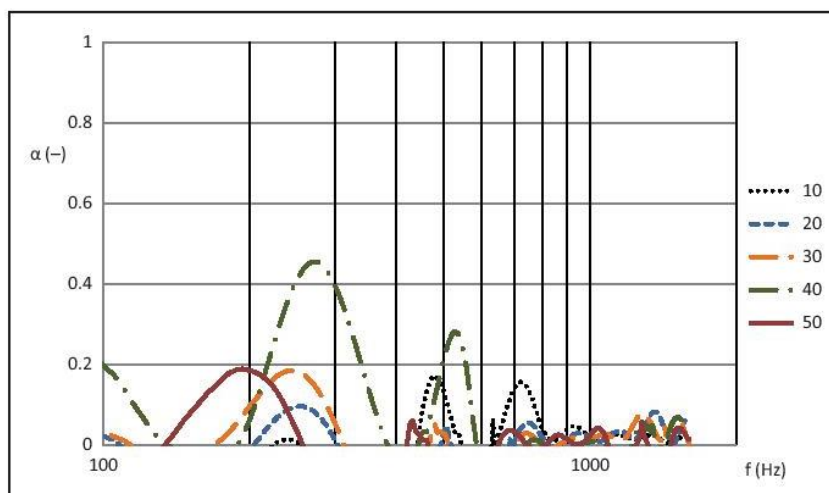
**Figure 5.** Component used to design the subsequent acoustic elements: aluminum perforated plates covered with a nanofiber layer with marked hole width  $w$ , hole spacing  $t$ , and angle  $60^\circ$ .

acoustic resonant membrane, which is brought into forced vibration upon the impact of sound waves of low frequency. The resonance frequency of the cavity resonator is then determined by the particular dimensions of its cavity/cavities, by the size, shape, and spacing of the inlet orifices leading into it/them, by its material, and by the quantity and character of the fillings of the cavity/cavities.

The nanofiber resonant membrane is then arranged on the surface of the cavity resonator, to which it is firmly attached—for example glued or laminated. Its parts, which overlap the orifices leading into the cavity/cavities of the cavity resonator, constitute separate resonant surfaces, whereby the resonant frequency of each of them is also determined, apart from the overall properties of the resonant membrane, also by their size, shape, and spacing (see Figure 1).

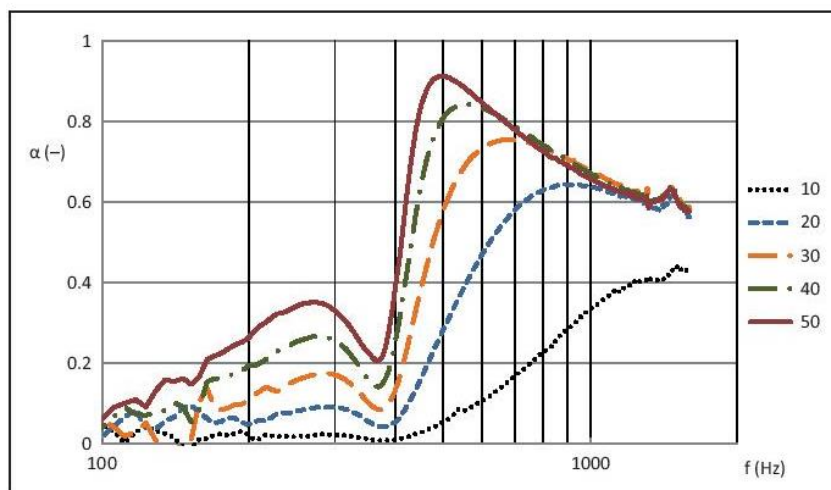
Upon the impact of sound waves, these resonant surfaces are brought into forced vibrations, which are subsequently damped by friction in the inner structure of the resonant membrane, by the friction of the resonant membrane against ambient air, and possibly against other layers of the material arranged in its proximity, wherein part of the kinetic energy of the resonating membrane is transmitted to the cavity resonator. Moreover, friction in the inner structure of the resonant membrane is further increased by the fact that the neighboring resonant surfaces can vibrate with mutually different periods and/or deviation.

For production of PA6 nanofibrous membranes, the cord electrospinning method was used.<sup>12</sup> In this method, the cord was connected to a high voltage supply and at the top of the cord there was a counter

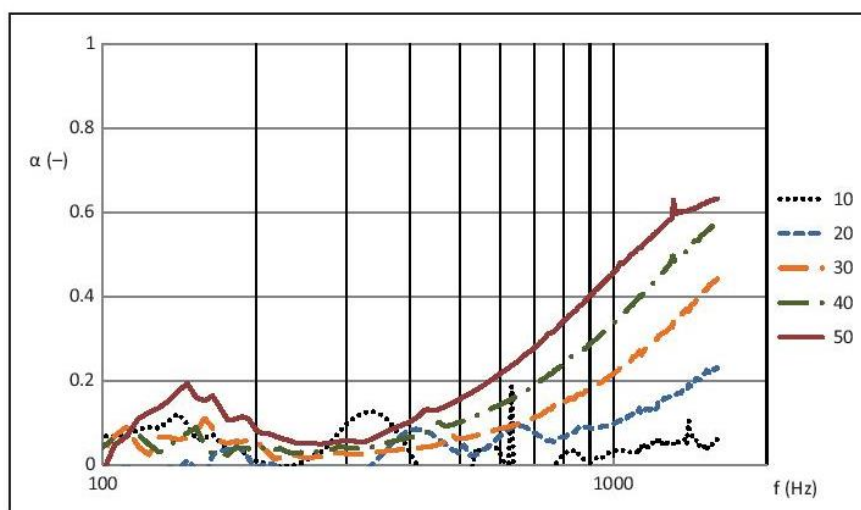


**Figure 6.** Frequency dependence of the sound absorption coefficient; aluminum perforated sheet with a thickness of 1 mm with centered circular holes with a hole diameter of 8 mm, hole spacing of 10 mm, without a nanolayer. Curves: 10: 10 mm from the wall; 20: 20 mm from the wall; 30: 30 mm from the wall; 40: 40 mm from the wall; 50: 50 mm from the wall.





**Figure 7.** Frequency dependence of the sound absorption coefficient; aluminum perforated sheet with a thickness of 1 mm with centered circular holes with a hole diameter of 8 mm, hole spacing of 10 mm, with a nanofibrous layer (N) on a carrier (E). Curves: 10: 10 mm from the wall; 20: 20 mm from the wall; 30: 30 mm from the wall; 40: 40 mm from the wall; 50: 50 mm from the wall.



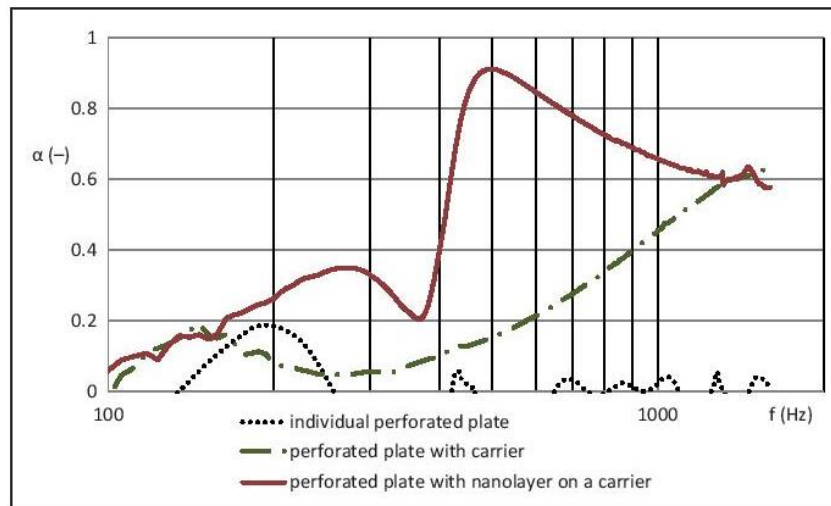
**Figure 8.** Frequency dependence of the sound absorption coefficient; aluminum perforated sheet with a thickness of 1 mm with centered circular holes with a hole diameter of 8 mm, hole spacing of 10 mm, without a nanolayer, with a nanolayer carrier (E). Curves: 10: 10 mm from the wall; 20: 20 mm from the wall; 30: 30 mm from the wall; 40: 40 mm from the wall; 50: 50 mm from the wall.

electrode, which was grounded. The polymeric solution was applied onto the cord around its whole circumference then the application means moving reversibly along the active spinning zone of the cord and the process of electrostatic spinning of the liquid polymeric material is started. Taylor cones were created on the cord surface towards the counter electrode. The nanofibers then covered the carrier during the electro-spinning process, without any conveyor or supporting material, such as paper. The average fiber diameter

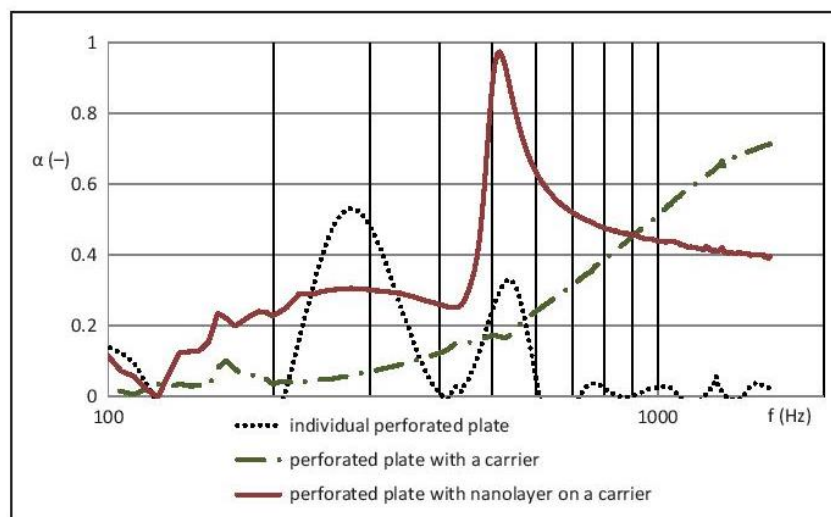
was  $160 \pm 57$  nm and the base weight of nanofibrous membrane was  $0.2 \pm 0.02$  g.m<sup>-2</sup>.

#### *The method used for determining the acoustic absorption coefficient of acoustic laboratory samples*

Apparatus was used to determine the sound absorption coefficient of laboratory circular samples with a diameter of 100 mm for a frequency range of 50–1600 Hz and 29 mm for a frequency range of 500–6400 Hz,



**Figure 9.** Frequency dependence of the sound absorption coefficient; aluminum perforated sheet with a thickness of 1 mm with square centered holes with a hole diameter of 8 mm, hole spacing of 10 mm, with a nanolayer carrier or with a nanolayer on a carrier. All samples are placed at a distance of 50 mm from wall.



**Figure 10.** Frequency dependence of the sound absorption coefficient; aluminum perforated sheet with a thickness of 1 mm with square centered holes with a hole width of 3 mm, hole spacing of 4 mm, with a nanolayer carrier or with a nanolayer on a carrier. All samples are placed at a distance of 50 mm from wall.

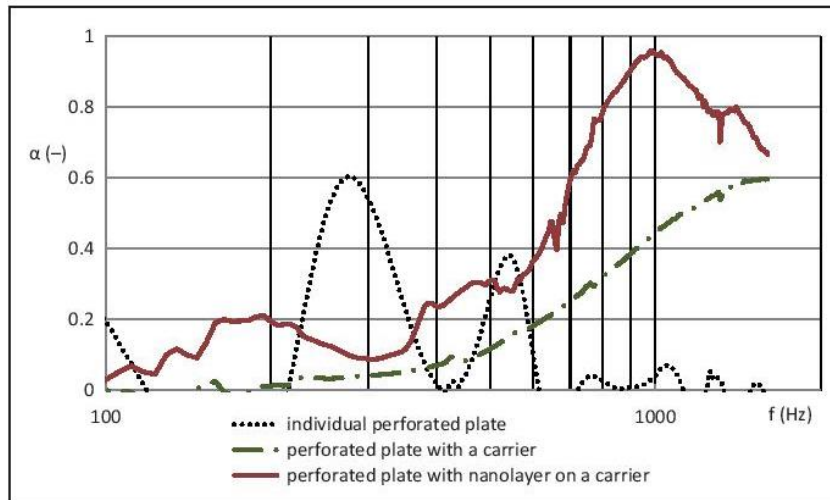
according to ASTM E1050-08. The method is based on an evaluation of the sound absorptive properties of materials at a normal incidence of sound waves.

Due to the fact that the holes in the frame were almost the same size as the diameter of the small tube of the measuring apparatus, one sample from each of arrangements was measured in a large tube with a diameter of 100 mm. A two-microphone impedance tube for determining the sound absorption coefficient was therefore

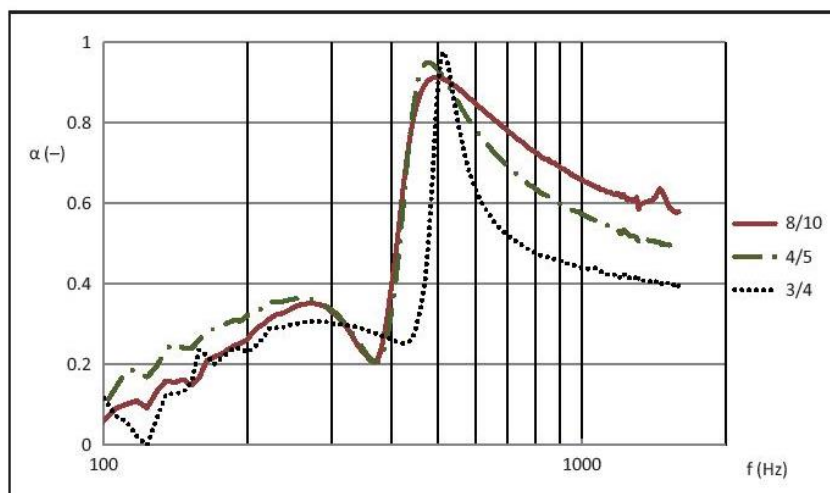
used to measure the limited frequency spectrum 100–1600 Hz. These frequencies, however, cover the area particularly focusing on middle and lower frequencies.

## Results and discussion

Figures 6–9 illustrate the sound absorbing properties of the proposed elements, where further components are gradually added to the visible perforated boards.



**Figure 11.** Frequency dependence of the sound absorption coefficient; aluminum perforated sheet with a thickness of 1 mm with square centered holes with a hole width of 30 mm, hole spacing of 40 mm, with a nanolayer carrier or with a nanolayer on a carrier. All samples are placed at a distance of 50 mm from wall.

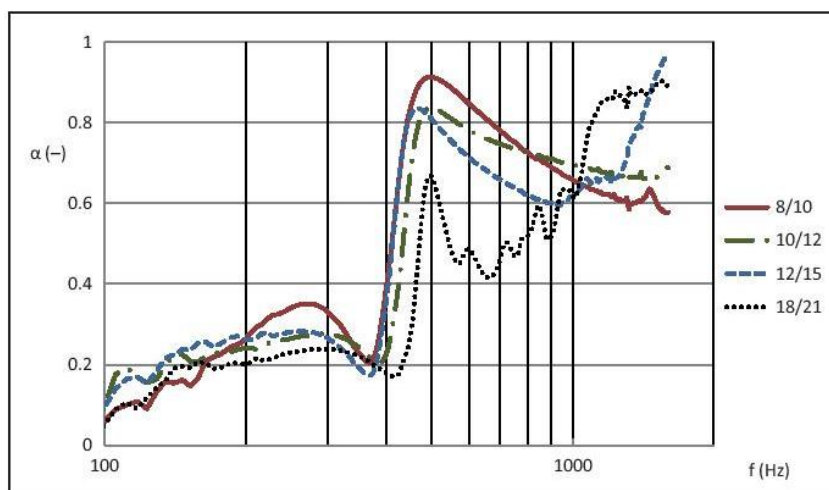


**Figure 12.** Frequency dependence of the sound absorption coefficient with decreasing hole width from the optimum (8/10); aluminum perforated board with a nanolayer on a carrier at a distance of 50 mm from wall. Holes arrangement: 8/10: perforated plate with hole width of 8 mm and hole spacing of 10 mm; 4/5: perforated plate with hole width of 4 mm and hole spacing of 5 mm; 3/4: perforated plate with hole width of 3 mm and hole spacing of 4 mm.

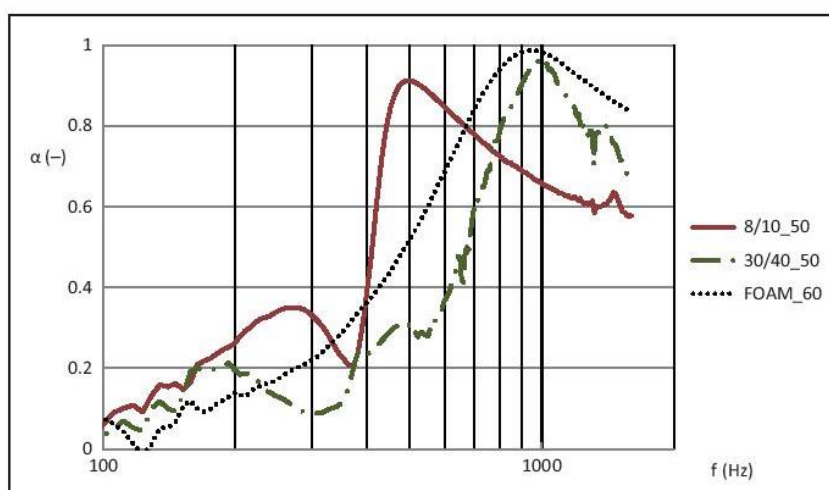
The hole width is 8 mm and hole spacing is 10 mm (see Figure 5). The acoustic element is measured at different distances from the wall (5–50 mm). Figure 6 shows the perforated board, Figure 7 shows the perforated board with a nanofiber layer on a thin carrier, and, in order to confirm the unique acoustic properties of the element with a nanolayer, Figure 8 shows a perforated board with a thin nanolayer carrier but without the nanofiber layer. From this comparison (Figures 6–8)

the huge sound absorption differences between all three components, where the each element is measured at different distances from the wall (5–50 mm), can be seen. In the case of an individual perforated board (see Figure 6), the distance from the wall does not have any significance. On the other hand, the sound absorption of a perforated board covered with carrier or nanofiber layer on a thin carrier (see Figures 7, 8) increases with distance from the wall. The perforated board covered





**Figure 13.** Frequency dependence of the sound absorption coefficient with increasing hole width from optimum (8/10); aluminum perforated board with a nanolayer on a carrier at a distance of 50 mm from wall. Holes arrangement: 8/10: perforated plate with hole width of 8 mm and hole spacing of 10 mm; 10/12: perforated plate with hole width of 10 mm and hole spacing of 12 mm; 12/15: perforated plate with hole width of 12 mm and hole spacing of 15 mm; 18/21: perforated plate with hole width of 18 mm and hole spacing of 21 mm.



**Figure 14.** Frequency dependence of the sound absorption coefficient; aluminum perforated board with a nanolayer on a carrier at a distance of 50 mm from wall with comparison of acoustic foam of 60 mm thickness. Curves: 8/10: perforated plate with nanolayer with hole width of 8 mm and hole spacing of 10 mm; 30/40: perforated plate with nanolayer with hole width of 30 mm and hole spacing of 40 mm; FOAM 60: foam rectangles with a thickness of 60 mm; width of the base of the rectangle 50 mm, depth of the rectangle 40 mm, height of the rectangle 60 mm.

with a nanofiber layer on a thin carrier (see Figure 7) provides high sound absorption at lower frequencies, with a maximum value of absorption at 500 Hz. The results between each arrangement are very different. Nevertheless, all of the distances from the wall have been measured for each arrangement, because the similar results between them could be found for different distance from the wall.

Figure 9 provides a summary comparison of the acoustic element with and without the nanolayers at a distance of 50 mm from the wall. Figure 10 provides a summary comparison of the acoustic element with and without the nanolayers at a distance of 50 mm from the wall. An aluminum perforated plate, alone, or covered with a carrier or with nanofiber layer, has hole width 3 mm, hole spacing 4 mm, and an angle of 60°. Figure 11 provides a

summary comparison of the acoustic element with and without the nanolayers at a distance of 50 mm from the wall. An aluminum perforated plate, alone, or covered with a carrier or with a nanofiber layer, has a hole width 30 mm, hole spacing 40 mm, and an angle of 60°.

From the comparison of Figures 9–11 we can see the optimal arrangement of holes inside the perforated plate according to the broadband sound absorption. The 8 mm wide and 10 mm distant holes provide the best results. The compact view gives Figures 12 and 13, where the same hole arrangement has been chosen for comparison of smaller and bigger holes, with optimum (8/10). With decreasing hole width from the optimum (see Figure 12), the sound absorption peak narrows. With increasing hole width from the optimum (see Figure 13), the sound absorption peak around 500 Hz disappears, and the sound absorption occurs at higher sound frequencies. Figure 14 compares the two variants of cavity/membrane resonators with material normally available on the market (acoustic PUR foam with a rectangular profile, having a total thickness of 60 mm). One of the variants shows similar results to foam (30/40) and the second one (optimum 8/10) shows better sound absorption at lower frequencies (around 500 Hz) and worse at higher sound frequencies above 700 Hz. The thickness of the cavity/membrane resonators is 1 mm, in comparison to the foam thickness of 60 mm. The space between the cavity/membrane resonator and the wall/ceiling (50 mm air gap in the experiment described) is a huge benefit of the new technology; this gap can be used for the installation of lighting, audio speakers, heating, and so on.

## Conclusions

The acoustic element is based on a solid or flexible frame in the form of a perforated board whose reverse side is covered by a thin carrier layer with a nanofiber membrane which, to a certain extent, protects the frame against mechanical damage. The frame has a further visual function. Given that the size of the holes in the frame almost reaches the diameter of the small tubes of the measuring apparatus, the samples were measured only in large tubes with a diameter of 100 mm. The two-microphone impedance tube for determining the sound absorption coefficient was therefore used for measuring the limited frequency spectrum 100–1600 Hz. These frequencies, however, cover the area particularly focused on middle and lower frequencies.

The optimal arrangement of holes inside the perforated plate, according to the broadband sound absorption, has been found. The 8 mm wide and 10 mm distant holes provide the best results. Optimization of elements is underway which, after evaluating their particular acoustic properties, will

lead to the selection and production of several prototypes designed for specific applications (light suspended ceilings, cladding, light objects, light three-dimensional objects, wing bars, kitchen doors, Japanese screens and blinds, and so on).

Based on the comparison of the nanofibrous elements with widely-used acoustic foam, it is clear that the developed acoustic element can compete with the material normally available on the market that achieved the best results during this study (PUR foam with a rectangular profile and a total thickness of 60 mm). The advantage of this technology is the space between the acoustic elements, with a thickness of 1–5 mm, and the wall/ceiling (50 mm air gap in experiment described – see Figure 14), which can be used for the installation of lighting or other services.

## Acknowledgement

I thank my doctoral student Tomas Ulrich for measurement support.

## Declaration of conflicting interests

The author declared no potential conflicts of interest with respect to the research, authorship, and/or publication of this article.

## Funding

The author disclosed receipt of the following financial support for the research, authorship, and/or publication of this article: The results of this project LO1201 were obtained through the financial support of the Ministry of Education, Youth and Sports in the framework of the targeted support of the “National Programme for Sustainability I” and the OPR&DI project Centre for Nanomaterials, Advanced Technologies and Innovation CZ.1.05/2.1.00/01.0005.

## References

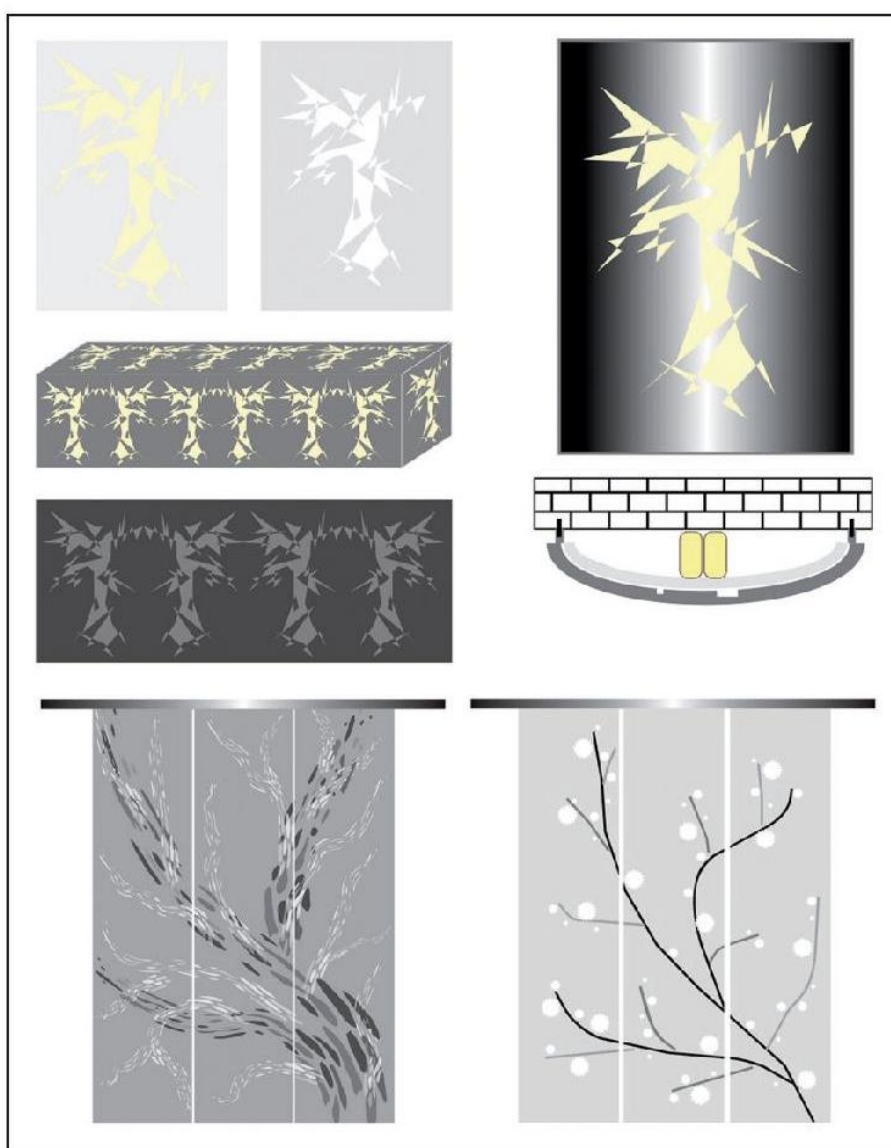
1. Lambert RF and Tesar JS. Acoustic structure and propagation in highly porous, layered, fibrous materials. *J. Acoust Soc Am* 1984; 76: 1231–1237.
2. Ding B, Kim HY, Lee SCh, et al. Preparation and characterization of nanoscaled polyvinyl alcohol fibers via electrospinning. *Fiber Polym* 2002; 3: 73–79.
3. Sakagami K, Kiyama M, Morimoto M, et al. Sound absorption of a cavity-backed membrane: a step towards design method for membrane-type absorbers. *Appl Acoust* 1996; 49: 231–241.
4. Skvor Z. *Akustika a elektroakustika*, 1st edn. Prague: Academia Praha, 2001, pp.314–344.
5. Sakagami K, Morimoto M and Yairi M. A note on the relationship between the sound absorption by microperforated panels and panel/membrane-type absorbers. *Appl Acoust* 2009; 70: 1131–1136.
6. Onen O and Caliskan M. Design of a single layer micro-perforated sound absorber by finite element analysis. *Appl Acoust* 2010; 71: 79–85.



7. Kalinova K. Nanofibrous resonant membrane for acoustic applications. *J Nanomater* 2011; 6 pp. DOI:10.1155/2011/265720.
8. Jirsak O, Kalinova K and Stranska D. Nanofibre technologies and nanospider applications. In: *Nanofair 2006, 5th Int. Nanotechnology Symposium*, Karlsruhe, Germany, 2006. Berlin: VDI Berichte/Springer, pp.41–44.
9. Kalinova K and Kolek O. *A sound absorbing means containing at least one cavity resonator*, Patent WO2014111068, CZ, 2014.
10. Kim S and Park K. *Electrostatic spinning equipment and method of preparing nano fiber using the same*, Patent WO2005042813, KR, 2005.
11. Jirsak O, Sanetrnik F, Lukas D, et al. *Method of nanofibres production from a polymer solution using electrostatic spinning and a device for carrying out the method*, Patent WO2005024101, 2006.
12. Maly M, Sejak P, Stromsky V, et al. *Method for application of liquid polymeric material onto spinning cords and a device for production of nanofibers through electrostatic spinning*, Patent WO2012139533, 2012.

## Appendix

The possible applications of an acoustic system based on the cavity/membrane resonance principle are suggested in Figure 15. The sound absorbing method can be used for the production of acoustic bodies, interior blinds, ceilings, screens, curtains, separating walls for interiors, light suspended ceilings, cladding, light objects, light three-dimensional objects, kitchen doors, Japanese screens and blinds, and so on.



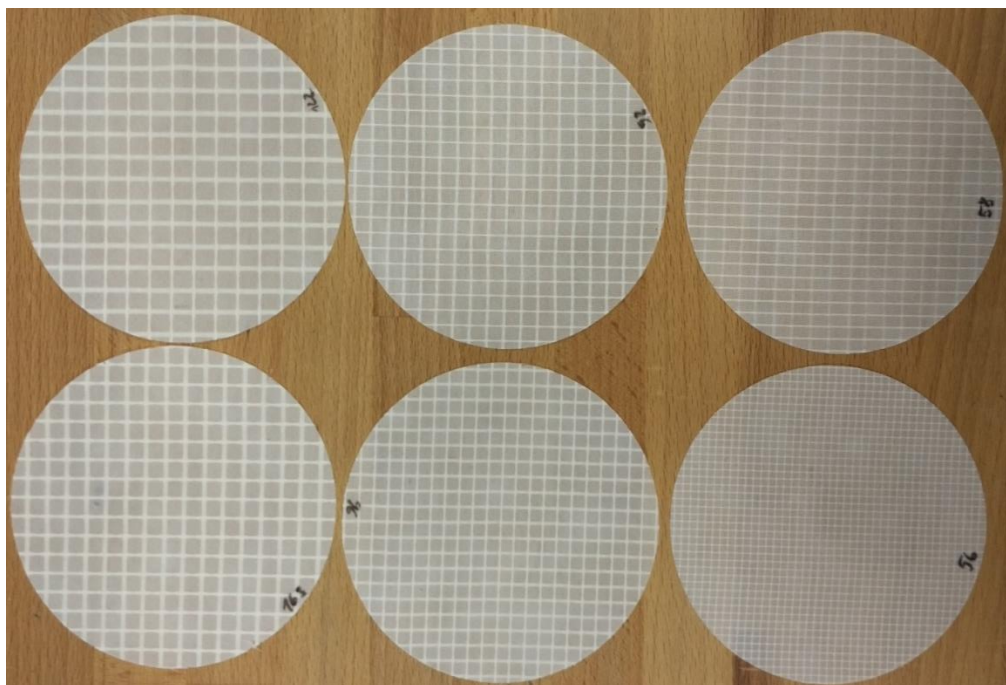
**Figure 15.** Future applications of nanofibrous acoustic system based on a solid frame in the form of a perforated plate whose reverse side is covered by a thin carrier layer with a nanofiber membrane.

### KAPITOLA III: VYUŽITÍ MŘÍŽKY/SÍTKY PRO OHRANIČENÍ PLOCHY KMITAJÍCÍ NANOVLÁKENNÉ MEMBRÁNY S MOŽNOSTÍ VOLBY VELIKOSTI A TVARU KMITAJÍCÍ PLOCHY

Uspořádání akustického prvku je založené na perforovaném panelu s nanovláknennou vrstvou, kde plocha nanovláknenné membrány je dána velikostí a tvarem perforace, která umožňuje kmitání membrány. Princip je popsán v úvodní kapitole U.2., resp. U.2.2.

Nejprve byly testovány sklovláknité mřížky s různou velikostí a roztečí ok s výhodou nehořlavosti pro aplikace akustických prvků ve stavebnictví (obraz 46). Nanovláknenná membrána byla touto mřížkou uchycena po celém obvodu oka, tzn. membrána mohla kmitat ve tvaru pravoúhelníku ve volném prostoru oka mřížky o následujících rozměrech:

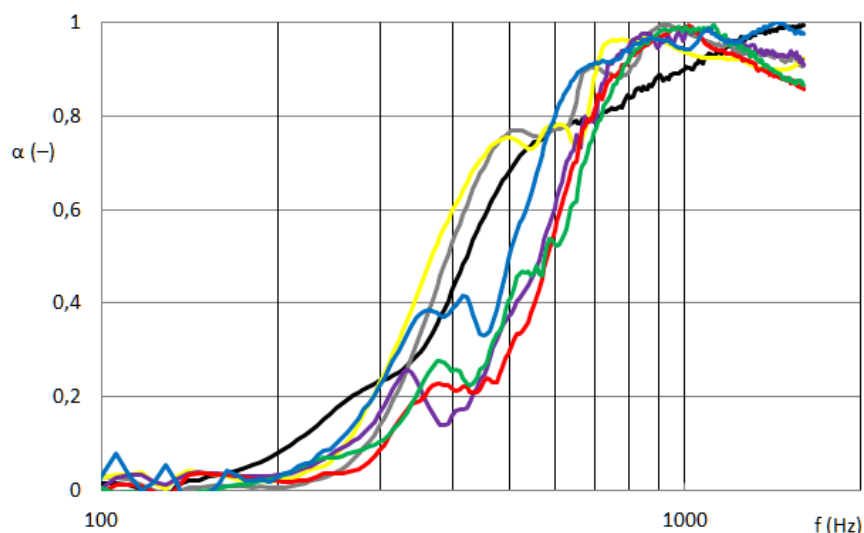
- NEHOŘLAVÁ MŘÍŽKA ADFORS R163 (velikosti oka 5x5, vnější rozteče 8x7 mm);
- NEHOŘLAVÁ MŘÍŽKA ADFORS R 122 (velikosti oka 6x5, vnější rozteče 9x8 mm);
- NEHOŘLAVÁ MŘÍŽKA ADFORS R96 (velikosti oka 4x4, vnější rozteče 6x5,5 mm);
- NEHOŘLAVÁ MŘÍŽKA ADFORS R58 (velikosti oka 4x3,5 vnější rozteče 6x4,5mm);
- NEHOŘLAVÁ MŘÍŽKA ADFORS R56 (velikosti oka 2x2, vnější rozteče 2,5x3 mm);
- NEHOŘLAVÁ MŘÍŽKA ADFORS R52 (velikosti oka 5x4, vnější rozteče 7x5,5 mm);
- SAMOLEPÍCÍ MŘÍŽKA ADFORS R52 (velikosti oka 3,5x3, vnější rozteče 6x5 mm).



Obraz 46: vzorky sklovláknitých mřížek ADFORS s aplikovanou nanovláknennou membránou.

Dle výsledků činitele zvukové pohltivosti vyrobených materiálů z různých mřížek (obraz 47) jsou zřejmé rozdíly zejména ve frekvenčním pásmu 350-700Hz. Nejširší frekvenční pásmo pokrývá vzorek mřížky s nanovláknennou membránou R163 (velikosti oka 5x5, vnější rozteče 8x7 mm).





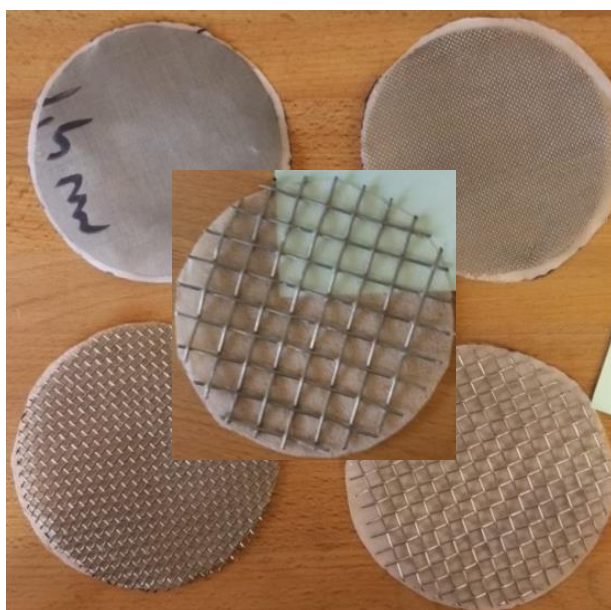
Obraz 47: frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti; Nanovrstva na nosiči (14%PA6, 0,2gsm) laminována na sklovláknitou mřížku ADFORS o tloušťce 1mm s otvory o různém rozměru a rozteči (YxY; RxR); měřeno ve vzdálenosti 50mm od stěny; KŘIVKY: červená - 2x2; 2,5x3; zelená - 4x3,5; 6x4,5; modrá - 4x4; 6x5,5; fialová - 5x4; 7x5,5; žlutá - 5x5; 8x7; šedá - 6x5; 9x8 a černá - 3,5x3; 6x5.

Z hlediska nehořlavosti byla dále ověřována drátěná síta o různé velikosti ok s prostorovým 3D uspořádáním (obraz 48 a). Byla testována drátěná síta o následujících rozměrech:

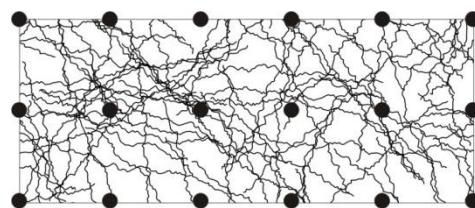
- DS1 (velikosti oka cca 0,2x0,2 mm; vnější rozteče 0,3x0,3 mm);
- DS2 (velikosti oka 1x1, vnější rozteče 1,2x1,2 mm);
- DS3 (velikosti oka 3x3, vnější rozteče 4x4 mm);
- DS4 (velikosti oka 5x5, vnější rozteče 7x7 mm);
- DS5 (velikosti oka 10x10, vnější rozteče 12x12 mm)

Velikost ok v tomto případě není úplně relevantní, jelikož nanovláknennou membránu uchycují drátěné vlny pouze v bodech, nikoli v linii jak znázorňuje obraz 48 b. Membrána tedy nekmitá pouze v rámci útvaru, který vymezují body, ale vliv na tento útvar má i okolní hmota membrány, která tak do systému vstupuje v celé ploše vzorku.

Obraz 49 porovnává drátěné mřížky (síta) o různých velikostech a roztečích ok (DS1 – DS5 v pořadí od nejmenší po největší velikosti oka). Jediný zajímavý výsledek pro nízké frekvence vykazuje vzorek s nejmenšími oky DS1 (červená křivka v grafu na obraze 49), který umožňuje nanovláknenné membráně rezonovat. Ostatní 3D drátěné mřížky uchycují membránu pouze bodově na vrcholu vlny drátu. Prostorové uspořádání není tedy pro akustický prvek přínosem. Pro ověření výjimečného výsledku drátěného síta DS1 je porovnán na obraze 50 činitel zvukové pohltivosti síta DS1 s a bez nanovláknenné vrstvy. Z tohoto je zřejmé, že samotné jemné síto nevykazuje rezonanční efekt, jak by se nabízelo.

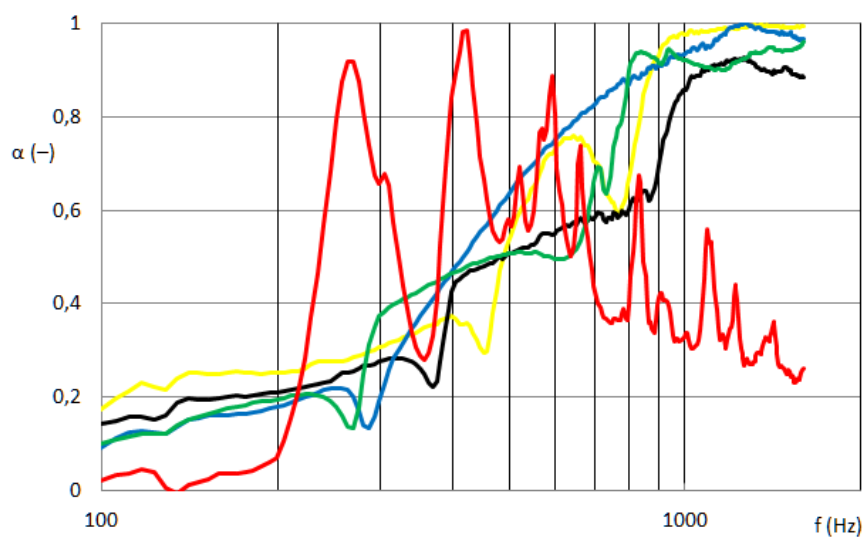


(a)

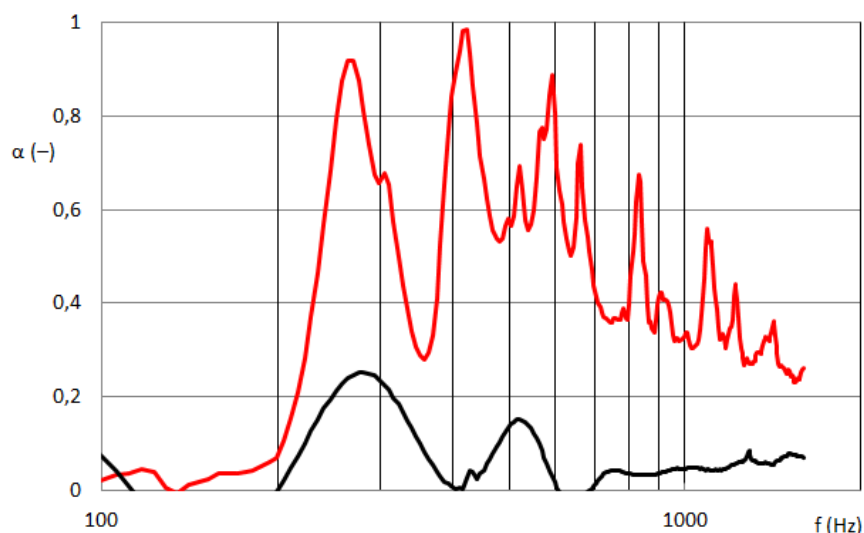


(b)

Obráz 48: (a) drátěná síta s aplikovanou nanovláknennou membránou různou velikostí ok (DS1 – DS5 v pořadí od nejmenší po největší „velikost“ oka); (b) znázornění bodů uchycení membrány na vrcholech vln propletených drátů síta.



Obráz 49: frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti; Nanovrstva na nosiči (14%PA6, 0,2gsm) laminována na drátěná síta s různou velikostí ok (DS1 – DS5 v pořadí od nejmenší po největší „velikost“ oka); měřeno ve vzdálenosti 50mm od stěny; KŘIVKY: červená – DS1, zelená – DS2, modrá – DS3, černá – DS4 a žlutá – DS.



Obraz 50: frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti; Nanovrstva na nosiči (14%PA6, 0,2gsm) laminována na drátěné síto DS1 (velikost oka cca 0,2x0,2mm; vnější rozte 0,3x0,3mm); měřeno ve vzdálenosti 50mm od stěny; KŘIVKY: červená – DS1 s nanovláknennou membránou, černá – DS1 samotné bez nano.

Následuje publikace, která se zabývá studiem akustického chování prvku s nanovláknennou membránou, kde kmitající plochu membrány zajišťuje pevný rám v podobě mříže různých velikostí a roztečí ok.

- KALINOVÁ, K. "Resonance effect of nanofibrous membrane for sound absorption applications" chapter 8 in the book "Resonance", ISBN 978-953-51-5617-8. IN TECH d.o.o, Janeza Trdine 9/51000 Rijeka, Croatia. Book edited by: Professor Jan Awrejcewicz, The Lodz University of Technology, Poland. Notification of acceptance July 11, **2017**. Sent to ISI Thomson Reuters Book Citation Index in the Web of Science™. <https://www.intechopen.com/books/resonance>

Tímto tématem se dále zabývají následující publikace autorky:

- Kalinová, K. Zvukově pohltivý prostředek obsahující alespoň jednu akustickou rezonanční membránu tvořenou vrstvou polymerních nanovláken, 2013. Udělen český patent dne **15.8.2014** pod číslem **304656**, číslo přihlášky PV2013-34, prioritá 18.1.2013. Zveřejněna přihláška na WIPO pod číslem: WO2014/111067A2 (A Sound Absorptive Element Comprising at Least one Acoustic Resonance Membrane Formed by a Layer of Polymeric Nanofibers); **LICENCOVÁN 21.11.2017**.
- Kalinova, K., „A Sound Absorptive Element Comprising an Acoustic Resonance Nanofibrous Membrane“ Recent Patents on Nanotechnology, **2015**, vol. 9, is.1. pp 61 – 69. ISSN 1872-2105. DOI 10.2174/187221050901150311102407
- Ozturk, M.K., Kalinova, K., Nergis, B., Candan, C. „A new noise protection system makes itself heard: A warp-knitted spacer textile in a composite with a nanofibrous membrane improves the sound-absorption capacity“ Kettenwirk-Praxis, Issue 2, **2014**, Pages 28-29

# RESONANCE



---

Edited by **Jan Awrejcewicz**

---

INTECH

**INTECH**

## Resonance

<http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.68248>

Edited by Jan Awrejcewicz

## Contributors

Betül Çalışkan, Ali Cengiz Çalışkan, Karlo Queiroz Costa, Nadson Souza, Jefferson Costa, Rafael Santos, Andre Cruz, Koichi Narahara, Klara Kalinova, Jiri Naprstek, Cyril Fischer, Vladimir L. Kalashnikov, Yannick Le Bras, Jean-Marc Greneche, Xianghong Kong, Lina Qiu, Gaobiao Xiao, Di He, Ken-Ichi Hino, Juan Manuel Velazquez Arcos, Jaime Granados-Samaniego, Alejandro Pérez-Ricárdez, Ricardo Teodoro Páez Hernández, Lukas Kurmann

## Published by InTech

Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia

## © The Editor(s) and the Author(s) 2017

The moral rights of the editor(s) and the author(s) have been asserted.

All rights to the book as a whole are reserved by InTech. The book as a whole (compilation) cannot be reproduced, distributed or used for commercial or non-commercial purposes without InTech's written permission. Enquiries concerning the use of the book should be directed to InTech's rights and permissions department ([permissions@intechopen.com](mailto:permissions@intechopen.com)).

Violations are liable to prosecution under the governing Copyright Law.



Individual chapters of this publication are distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License which permits commercial use, distribution and reproduction of the individual chapters, provided the original author(s) and source publication are appropriately acknowledged. More details and guidelines concerning content reuse and adaptation can be found at <http://www.intechopen.com/copyright-policy.html>.

## Notice

Statements and opinions expressed in the chapters are these of the individual contributors and not necessarily those of the editors or publisher. No responsibility is accepted for the accuracy of information contained in the published chapters. The publisher assumes no responsibility for any damage or injury to persons or property arising out of the use of any materials, instructions, methods or ideas contained in the book.

**Publishing Process Manager** Ana Vais

**Technical Editor** SPI Global

**Cover** InTech Design team

First published November, 2017

Printed in Croatia

Legal deposit, Croatia: National and University Library in Zagreb

Additional hard copies can be obtained from [orders@intechopen.com](mailto:orders@intechopen.com)

Resonance, Edited by Jan Awrejcewicz

p. cm.

Print ISBN 978-953-51-3633-0

Online ISBN 978-953-51-3634-7



---

# Contents

---

## Preface VII

- Chapter 1 **Magnetic Resonance 1**  
Betül Çalışkan and Ali Cengiz Çalışkan
- Chapter 2 **Magneto-Elastic Resonance: Principles, Modeling and Applications 13**  
Yannick Le Bras and Jean-Marc Greneche
- Chapter 3 **Stochastic Resonance and Related Topics 35**  
Jiří Náprstek and Cyril Fischer
- Chapter 4 **Chaotic, Stochastic Resonance, and Anti-Resonance Phenomena in Optics 71**  
Vladimir L. Kalashnikov
- Chapter 5 **Optimization of Double-Well Bistable Stochastic Resonance Systems and Its Applications in Cognitive Radio Networks 91**  
Di He
- Chapter 6 **Resonances in Left-Handed Waves Developed in Nonlinear Electrical Lattices 111**  
Koichi Narahara
- Chapter 7 **Introduction to Parametric and Autoparametric Resonance 131**  
Lukas C. Kurmann
- Chapter 8 **Resonance Effect of Nanofibrous Membrane for Sound Absorption Applications 153**  
Klara Kalinova

- Chapter 9 **Modal Analysis of Surface Plasmon Resonance Sensor Coupled to Periodic Array of Core-Shell Metallic Nanoparticles** 169  
Nadson Welkson Pereira de Souza, Jefferson Souza Costa, Rafael Correa dos Santos, André Felipe Souza da Cruz, Tommaso Del Rosso and Karlo Queiroz da Costa
- Chapter 10 **Fano Resonance in High-Permittivity Objects** 189  
Xianghong Kong, Lina Qiu and Gaobiao Xiao
- Chapter 11 **Laser-Induced Fano Resonance in Condensed Matter Physics** 209  
Ken-ichi Hino, Yohei Watanabe, Nobuya Maeshima and Muneaki Hase
- Chapter 12 **Resonances and Exceptional Broadcasting Conditions** 233  
Juan Manuel Velázquez-Arcos, Alejandro Pérez-Ricardez, Ricardo Teodoro Pérez-Hernández and Jaime Granados-Samaniego

---

# Resonance Effect of Nanofibrous Membrane for Sound Absorption Applications

---

Klara Kalinova

Additional information is available at the end of the chapter

<http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.70361>

---

## Abstract

Nanofibrous layers have unique acoustic properties due to the large specific surface area of the nanofibers, where viscous losses may occur and also the ability of the nanofiber layer to resonate at its own frequency. The resonance membrane is then, upon impact of sound waves of low frequency, brought into forced vibrations, whereby the kinetic energy of the membrane is converted into thermal energy by friction of individual nanofibers, by the friction of the membrane with ambient air, and possibly with other layers of material arranged in its proximity, and part of the energy is also transmitted to the frame, by which means the vibrations of the resonance membrane are damped. When sound waves hit the nanofiber membrane, they introduce forced vibrations in the case of resonance which have maximal amplitude. The principle of the technology is achieved by the synergy of perforated plate in the form of a cavity resonator with nanofibrous layer in the form of resonant membrane. The parameters of the resonant nanofibrous membrane together with the shape and volume of the perforations then determine which sound frequencies will be damped and to what extent.

**Keywords:** membrane, nanofibers, sound absorption, foil

---

## 1. Introduction

The confusion between sound insulation and sound absorption is often phenomenon. Sound-absorbing materials play an indispensable part in controlling noise generated within a room or in reverberant areas. Although such materials are highly effective as sound absorbers, they are relatively poor sound insulators because of their soft, porous, and lightweight construction. Sound insulation prevents sound traveling from one place to another such as between apartments in a building. A part of sound energy is absorbed, the next part is reflected, and the rest is transmitted to the second room. The sound attenuation is due to the air viscosity, nonreversible deformation of material, and the thermal conduction between the fibers and the

air. The sound absorption also depends on structure characteristics, that is, fiber arrangement, fiber fineness, density of fiber, porosity, and so on. The sound absorption of lower frequencies becomes the main problem of this acoustic section.

Nanofibrous layers have unique acoustic properties due to the large specific surface area of the nanofibers, where viscous losses may occur and also the ability of the nanofiber layer to resonate at its own frequency. The resonance membrane is then, upon impact of sound waves of low frequency, brought into forced vibrations, whereby the kinetic energy of the membrane is converted into thermal energy by friction of individual nanofibers, by the friction of the membrane with ambient air, and possibly with other layers of material arranged in its proximity, and part of the energy is also transmitted to the frame, by which means the vibrations of the resonance membrane are damped. When sound waves hit the nanofiber membrane, they introduce forced vibrations in the case of resonance which have maximal amplitude.

### 1.1. Membrane resonators

Materials based on resonance principle can be divided into three groups: arrangements behaving as vibrating membranes, arrangements behaving as vibrating plates, and arrangements consisting in the principle of Helmholtz resonators.

The work [1] uses a mechanic analogy of an acoustic resonance system consisting of an acoustic mass  $m_a$  connected to an acoustic plasticity  $c_a$ , the movement of which is dampened by an acoustic resistance  $R_a$ . The behavior of the membrane (plate) can be compared to the behavior of a corpus with a certain mass flexibly connected to a spring (represented by an air cushion, of by the air in material pores). Assuming that the elements representing the mass are perfectly stiff and the elements representing the flexibility have no mass, this problem can be compared to the theory of linear circuits in the field of electrical engineering, where the coils are considered as having no capacity, condensers having no inductivity, and resistors being purely ohmic [2]. As in the field of electrical engineering, where the notion of electrical impedance is introduced, which is defined as the ratio between the voltage and current, a similar variable can be introduced for acoustic systems—the acoustic impedance  $Z$ . It is defined as the ratio of the pressure affecting the system and the volumetric rate at which the system vibrates thanks to the effect of the abovementioned force. For individual elements, apply the following:

$$Z_m = j\omega m_a, Z_R = R_a, Z_c = \frac{1}{j\omega c_a} \quad (1)$$

where  $j$  is an imaginary unit,  $\omega$  the angular frequency, in  $s^{-1}$ .

Assuming that the system is not damped ( $R_a = 0$ ), it meets the equation

$$j\omega m_a + \frac{1}{j\omega c_a} = 0, \quad (2)$$

the resonance of the system according to Ref. [1] then occurs at the frequency

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{m_a c_a}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{m_{sq} d}}, \quad (3)$$

where  $c$  is the speed of sound propagation through the environment, in  $\text{m s}^{-1}$ ,  $\rho$  is the air density, in  $\text{kg m}^{-3}$ ,  $m_{sq}$  is the surface density of the membrane, in  $\text{kg m}^{-2}$ , and  $d$  is the thickness of the air cushion in m.

The influence of the surface density of the membrane on the resonance frequency of the system, or the sound absorption coefficient that increases with this characteristics, is also apparent. We can also notice the shift in the maximums of the sound absorption coefficient toward lower frequencies.

A thin circular membrane is defined in Ref. [3] as a structure that arises by stretching, for example, a thin homogeneous elastic film with a constant surface density to a rigid circular frame. The membrane gains its rigidity by means of this stretching induced by radially acting force. The resonance frequency of a thin circular membrane is defined using the relation

$$f_i = \frac{a_{0,i}}{2\pi R} \sqrt{\frac{\nu}{m_{sq}}}, \quad (4)$$

where  $a_{0,i}$  are constants of symmetric vibrations of the circular membrane for  $i$ -modes,  $R$  is the membrane diameter, in m, and  $\nu$  radially acting stretching force related to the unit of the frame diameter (membrane tension), in  $\text{N m}^{-1}$ .

From the above, it shows that the resonance frequency of the membrane decreases with its increasing surface density. Membrane resonators based on a resonant principle of a nanofibrous layer function effectively as slim lightweight absorbing solutions. Contrary to conventionally used microscale sound absorbers, sound-absorbing membranes based on sub-micron fibers show a higher absorption abilities—due to the possibility of resonating on its own resonant frequency, the nanofibrous membrane is able to absorb critical lower sound frequencies. These unique properties come from the nature of nanofibrous layers, that is, small fibrous diameter (respectively, high specific surface area) and high porosity. This makes it possible to reach higher viscous loss inside the material and consequently to dissipate the acoustic energy. Nanofibrous elements and optimal rigidity of the membrane itself then allow an acoustic system to vibrate more efficiently [4, 5]. Resonant nanofibrous membranes of insignificant thickness are prepared from different polymer solutions in the form of electrospun nanofibers captured on a substrate layer via electrospinning method.

The theoretical bases of sound absorption characteristics that the paper deals with are studies performed by Sakagami et al. The study [6] focuses on a membrane-type sound absorber. To analyze the absorption mechanism, the solution is rearranged in a form which points out the contribution from each element of the membrane. The effects of the parameters of the sound absorption system are discussed in the light of the calculated results. Also, the method used for predicting the peak frequency and the peak value of the oblique-incident absorption coefficient



of the membrane-type sound absorber is presented and satisfactorily explains the relationship between the absorption characteristics and the parameters.

Resonant behavior of a microperforated panel for various perforation ratios in comparison with a panel-/membrane-type absorber is presented in Ref. [7], considering back-wall surface effect. The effectiveness of a fiber-based sound absorbance material involves several parameters such as porosity, tortuosity, fiber diameter, surface density, and thickness [8]. The optimal material types and structural characteristics of such membranes are in the deep interest of researchers, and although some have been proposed, it still remains as a subject of research. Kalinová has demonstrated that the resonance frequency of polyvinyl alcohol (PVA) nanofibrous acoustic membranes decreases with an increasing surface density and the average diameter of the nanofibers [5]. Rabbi et al. sandwiched polyacrylonitrile (PAN) and polyurethane (PUR) nanofibrous membrane between two nonwoven layers of polyester (PET) and wool. All materials with electrospun membrane(s) were found to significantly increase its absorbance. Moreover, the effect of nanofiber layer's number and its surface density was investigated [9]. Asmatulu et al. tested the sound absorbance property of electrospun polyvinyl chloride (PVC) mat of different thickness and with fiber diameters ranging from a few hundred nanometers to a few microns. When the fiber diameter goes beyond 500 nm, the sound absorbance shift toward the lower frequency with a thicker mesh but absorption coefficients remain the same [4].

## 1.2. Helmholtz's resonators

Helmholtz's resonators are acoustic systems that consist of a swinging air plug and a connected air volume. It can have a variety of forms: an empty wine bottle, corpus of a string instrument, bass reflex enclosures of loudspeakers, and wall coverings made of perforated panel. These acoustic systems can be arranged either separately or jointly to the perforated board, which is mounted to a certain distance from the wall [10].

In the study [11], the variable system of sound absorption power by the chairs in the low-frequency range was examined. As the results of scale model experiments (1/10 scale) in the reverberation room, the absorption power was controlled in the low-frequency range by the opening and closing of holes of the resonator. The diameter of holes, a neck's length, and a cavity volume of the seat were evaluated. The result was obtained for 125 or 250 Hz by changing the cavity volume of the seat in the experiment.

An acoustical structure consisting of a large-scale isolated resonator with a large-diameter cylindrical cavity has been studied in the work [12]. This resonator differs from the classical Helmholtz's resonator where the cavity is only several millimeters in diameter and lined with a sound-absorbing material. The impedance of the cavity and the impedance of the volume of the resonator are calculated. Calculations show that the sound energy is absorbed by resonators made of sound-reflecting materials. Absorption is of a resonant character with the resonant frequency at 60 Hz. A resonator measuring  $200 \times 200$  cm, with the cavity diameter of 50 cm and the distance to the rigid surface being 30 cm, absorbs  $3.5 \text{ m}^2$  of sound energy at the resonant frequency. At very low frequencies, changes in the imaginary parts of both cavity and radiation impedances occur along with the increase in the cavity diameter and frequency.

The study [13] deals with the effect of orifice geometry on the resonance frequency of Helmholtz's resonators. Helmholtz's theoretical formula for calculating resonant frequency  $f_H$  is as follows:

$$f_H = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{a}{V}}, \quad (5)$$

where  $c$  is the sound velocity,  $a$  is the diameter of orifice, and  $V$  is the volume of cavity. Further, Sondhauss's calculation of resonant frequency  $f_S$  with the correction  $\delta = 4a/3\pi$  is then

$$f_H = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{V(l + 2\delta)}}, \quad (6)$$

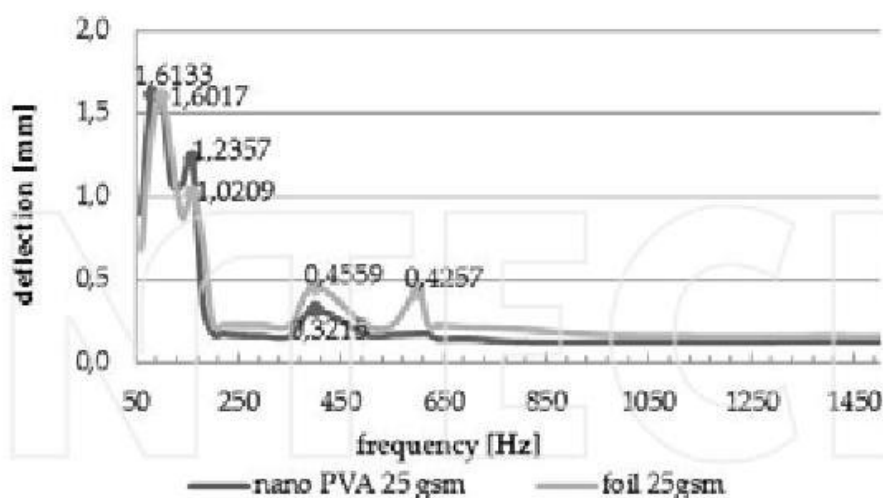
where  $A$  is the orifice area and  $l$  is the orifice thickness.

### 1.3. Measuring methods

Vibration phenomena can be investigated by the noninvasive optical methods. One of the most widely used methods for vibration measurement and analysis is laser vibrometry that can be combined with the high-speed camera. This approach can be seen in different application fields, for example, the development and monitoring of high-speed milling devices [14–21]. Nabavi describes the utilization of the particle image velocimetry technique to measure the velocity of the standing waves within an air-filled rigid-walled square channel subjected to acoustic standing waves. The data were compared with the analytical results obtained from the time-harmonic solution of the wave equation [22].

The resonant effect of nanofibrous membrane has been studied by means of high-speed digital camera in the author's paper [23]. The study attempted to predict the sound absorption behavior of the PVA nanofibrous membrane in comparison with the homogeneous membrane structure using an experimental setup involving a high-speed camera. The membrane has been exposed to plane sinusoidal sound wave and its deflection was picked by the high-speed digital camera. The resonant peaks of oscillating nanofibrous membrane as well as homogeneous membrane occur (see **Figure 1**). The recent study [24] shows how except for the lowest frequencies (first resonance peak), the resonant behavior of the membrane is affected by the resonance of the tube when the effect of mass per unit area on resonance frequencies of the membrane placed in an open and closed tubes is investigated.

Two-microphone impedance measurement tube type 4206 is used to measure the absorption coefficient in the frequency ranges from 100 Hz to 6.4 kHz. This is achieved by measuring the incident and reflected components of random noise, which is generated inside the tube. From the incident and reflected components of the sound pressure at two microphone positions, the frequency response functions are calculated due to the cross-spectrum of the two microphone signals. Using these values, the sound absorption coefficient can be determined. An apparatus is used to determine the sound absorption coefficient of laboratory circular samples with a



**Figure 1.** The resonance peaks of nanofibers compared with foil (took over author's paper 23).

diameter of 100 mm for a frequency range of 100–1600 Hz and 29 mm for a frequency range of 500–6400 Hz, according to the standard ASTM E1050-08.

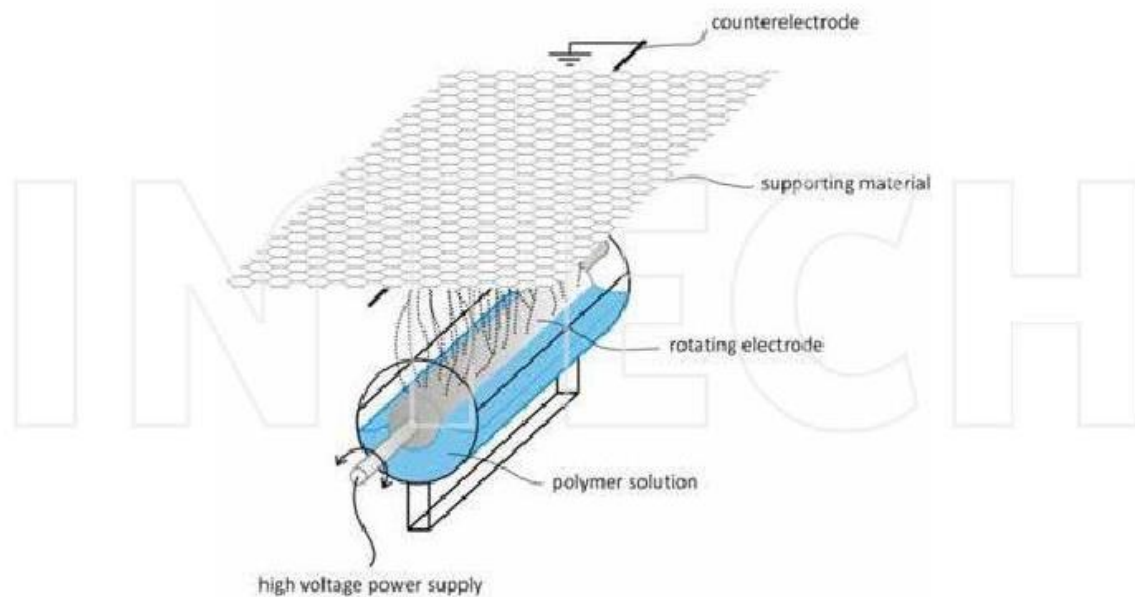
Due to the fact that the quad perforations in the plate were almost the same size as the diameter of the small tube of the measuring apparatus, the samples were measured only in a large tube with a diameter of 100 mm for a limited frequency range of 100–1600 Hz. These frequencies, however, cover the area particularly focusing on middle and lower frequencies.

## 2. Acoustic element design

### 2.1. Production of nanofibrous layer for membrane resonator design

For the production of nanofibrous membranes, roller electrospinning method (nanospider machine) was used. In this method, there is a roller that is connected to a high voltage supplier, and at the top of the roller there is a counterelectrode that was grounded. Taylor cones are created on the roller surface toward counterelectrode (**Figure 2**). Individual nanofibrous layer of very low basis weight of about 0.1–2 g/m<sup>2</sup> is not self-supporting. That is why the nanofibers are deposited on a thin supporting textile. This carrier has to be sound permeable with a low basis weight of about 20–50 g/m<sup>2</sup>. Process parameters such as roller speed, distance between the electrodes, voltage, and so on are set for an optimal nanofiber diameter and the basis weight of nanofibrous membrane.

For the production of PA6 nanofibrous membranes, the cord electrospinning method was used [25]. In this method, the cord was connected to a high voltage supply, and at the top of the cord there was a counterelectrode, which was grounded. The liquid polymeric material is applied onto the cord around its whole circumference, and then the application means moving reversibly along the active spinning zone of the cord and the process of electrostatic spinning of the liquid polymeric material is started. Taylor cones were created on the cord surface toward the counterelectrode.



**Figure 2.** Schematic diagram of roller electrospinning method used for PVA nanofibrous membrane production.

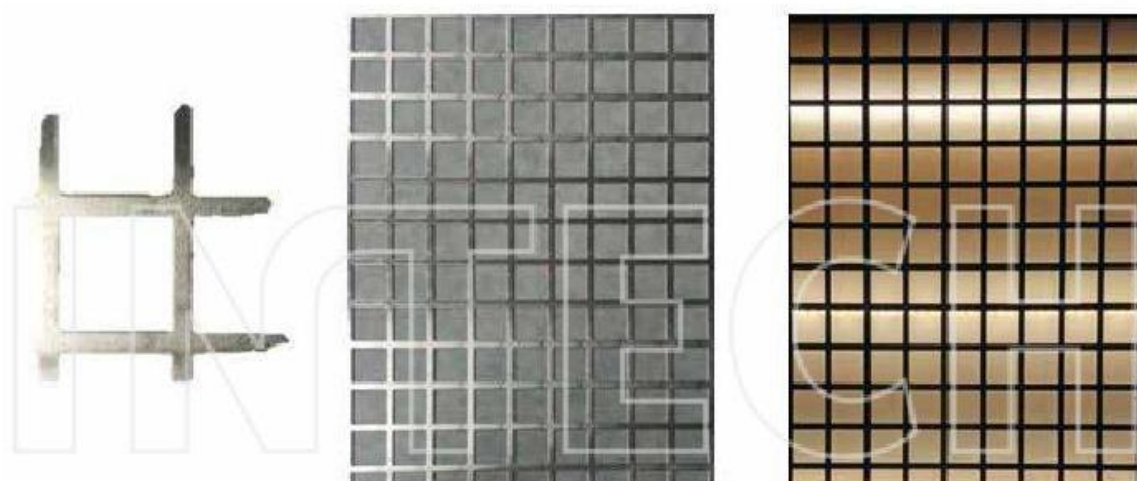
## 2.2. Cavity resonator together with nanofibrous resonant membrane

The principle of the technology is achieved by the synergy of the perforated plate in the form of a cavity resonator with nanofibrous layer in the form of a resonant membrane. The resonant nanofibrous membrane is arranged on the surface of the cavity resonator, to which it is fixedly attached, for example, glued or laminated, and so on. Its parts, which overlap the orifices leading into the cavities of the cavity resonator, constitute separate resonant surfaces, whereby the resonant frequency of each of them is determined, apart from the overall properties of the resonant membrane, also by their size and shape. Upon impact of sound waves, these resonant surfaces are brought into forced vibrations, which are subsequently damped by friction in the inner structure of the resonant membrane, by the friction of the resonant membrane against ambient air, and possibly against other layers of the material arranged in its proximity, wherein part of the kinetic energy of the resonating membrane is transmitted to the cavity resonator. Moreover, friction in the inner structure of the resonant membrane is further increased by the fact that the neighboring resonant surfaces can vibrate with mutually different periods or deviation.

At the same time, it is possible—while maintaining the thickness of the acoustic element—to damp sound frequencies which could be normally damped by the cavity resonator with extremely large air gap. In order to obtain the required sound-absorbing properties, the resonant membrane can be arranged on both opposing surfaces of the cavity resonator.

The acoustic element is based on a quad hollow plate (see **Figure 3**) whose reverse side is covered by a thin carrier layer with a nanofibrous membrane which to a certain extent protects the frame against mechanical damage. For the final application in the room acoustic, the space between the nanofibrous membrane covering the thin perforated plate and the wall or ceiling





**Figure 3.** Components used to design the acoustic elements—aluminum quad hollow plate 9/11 (size of perforation is  $9 \times 9$  mm, span of perforation is  $11 \times 11$  mm) with a thickness of 1 mm (left) covered with a nanofiber layer (middle) lighted (right).

(20–50-mm air gap in the mentioned experimental) is of huge benefit to the new technology. It can be used for the installation of lighting, audio speakers or heating, and so on. The sound-absorbing means can be used, for example, for the production of acoustic bodies, interior blinds, tiling, ceilings, screens, and separating walls for interiors, or, as the case may be, segment or profile elements for the transportation industry (paneling of cabin).

**Figure 3** (on the right) shows the final lighted prototype of acoustic system based on nanofibrous membrane covering the thin perforated plate. The resonance frequency of the acoustic system is then determined especially by dimensions of plate perforations, by the size and shape of the inlet orifices, and by its material and thickness of the plate.

**Table 1** shows the calculation of resonant frequency for each of quad perforated plates that have been studied at the experimental section of this work.

Firstly, due to the fact that the quad perforations in the plate were almost the same size as the diameter of the small tube of the measuring apparatus, the samples were measured only in a

Quad hollow plate (quad size in mm/quad span in mm)	$f_H$ (Hz)	$f_S$ (Hz)
3/5	2682	2467
4/6	2581	2462
5/7	2473	2415
8/10	2190	2219
9/11	2112	2155
10/12	2040	2095
25/30	1290	1369

**Table 1.** Calculated resonant frequency of separate perforated plates based on Helmholtz's ( $f_H$ ) formula (5) and Sondhauss's ( $f_S$ ) formula (6).



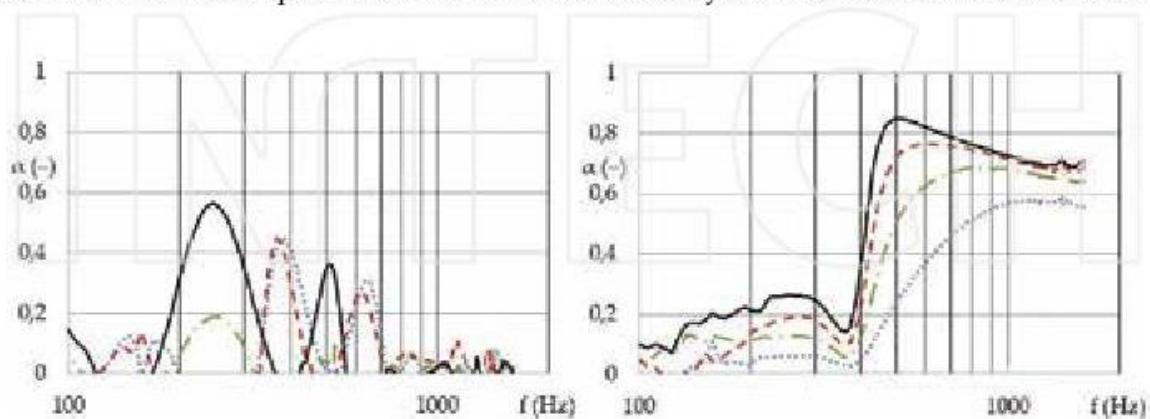
large tube with a diameter of 100 mm for a limited frequency range of 100–1600 Hz. These frequencies, however, do not cover the resonant frequencies of separate perforated plates calculated in **Table 1**. Secondly, in the case of nanofibrous layer in a form of resonant membrane, the measurement of membrane tension  $\nu$  for resonant frequency calculation according to formula 4 is impossible because of the low tension together with non-homogeneous nanofibrous layer. It is why the resonant frequency of nanofibrous membrane has been determined by the optical method [24] where the first resonant peak was detected around 100 Hz. Then, the results of nanofibers-covering perforated plate and the separate perforated plate are compared only by way of sound absorption curves.

### 3. Sound absorption results

In this section, the sound absorption measurements of acoustic means with nanofibrous membrane are shown. Two-microphone impedance measurement tube type 4206 was used to measure the sound absorption coefficient in a limited frequency range of 100–1600 Hz.

The following figures show a graphs of sound absorption coefficients  $\alpha$  in dependence on the frequency of sound for separate aluminum plate having different size of orifices and spacing between quad orifices, which is deposited in different distances from the wall (i.e., separate Helmholtz resonator), as well as for sound-absorbing means comprising this perforated plate, whose surface is overlapped by the resonant membrane formed by the layer of nanofibers from polyamide 6 (PA6) having a basis weight of  $0.2 \text{ g m}^{-2}$  deposited on a thin carrier having a basis weight of  $25 \text{ g m}^{-2}$ . One of the configurations is filled by a foam or a fleece having a thickness of 20 mm.

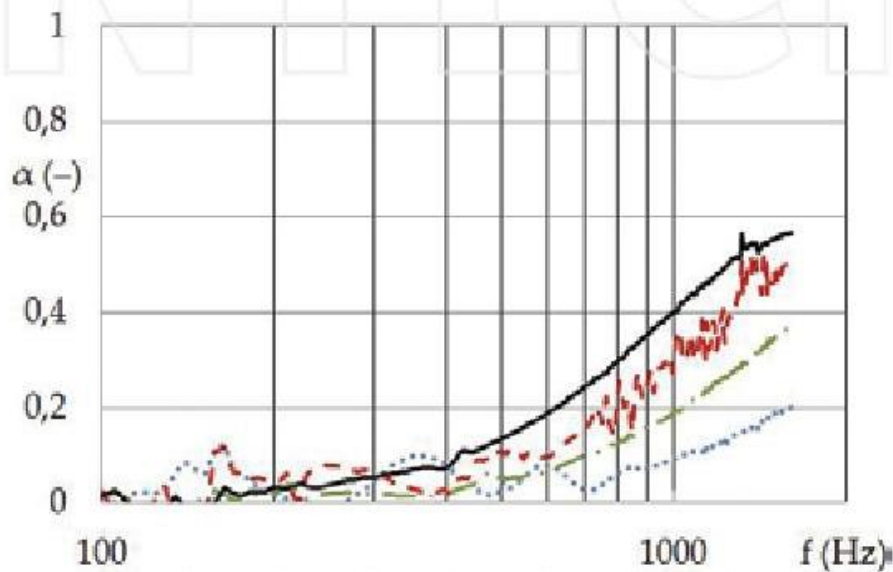
The individual perforated plate and the same perforated plate covered by a thin carrier with nanofibers have been compared and are shown in **Figure 4**. The huge growth of sound absorption of middle frequencies can be seen. Starting with 500 Hz, the sound absorption curve of nanofibers improved element is constant contrary of the unstable curve of individual



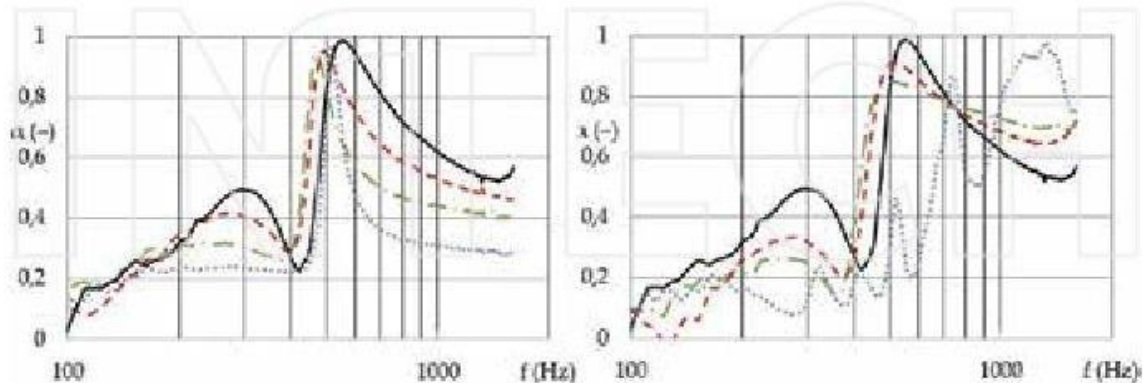
**Figure 4.** Frequency dependence of the sound absorption coefficient; quad hollow plate 9/11 (side of quad perforation is 9 mm, span of quad perforation is 11 mm) with a thickness of 1 mm with an air gap of 20 (blue - dotted), 30 (green - dash-dotted), 40 (red - dashed), and 50 mm (black) on the left. Nanofibrous membrane of  $0.2 \text{ g/m}^2$  on a carrier of  $25 \text{ g/m}^2$  covering the same perforated plate (quad 9/11) on the right.

perforated plate. For the verification of nanofibrous membrane efficient, the individual nanofiber carrier without nanofibers has been evaluated and is shown in **Figure 5**. Then, it is evident that the carrier-covering perforated plate improves the sound absorption of high frequencies but it does not provide wide-frequency efficiency as well as nanofibers improving plate.

Quad perforated plate of different sizes and spans has been evaluated and is shown in **Figure 6**. When the size of the perforation is  $9 \times 9$  mm and the span of the perforation is  $11 \times 11$  mm, then it is marked (9/11).



**Figure 5.** Frequency dependence of the sound absorption coefficient; individual carrier of  $25 \text{ g/m}^2$  covering the perforated plate (quad 9/11) with an air gap of 20 (blue - dotted), 30 (green - dash-dotted), 40 (red - dashed), and 50 mm (black) between the acoustic element and the wall.



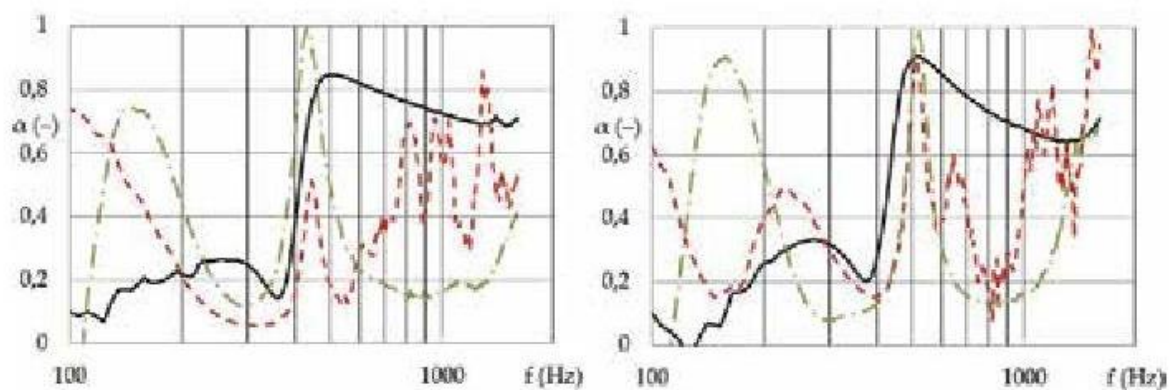
**Figure 6.** Frequency dependence of the sound absorption coefficient; nanofibrous membrane of  $0.2 \text{ g/m}^2$  on a carrier of  $25 \text{ g/m}^2$  covering the quad perforated plate of different size with a thickness of 1 mm with an air gap of 50 mm. Quad perforated plate of 3/5 (blue - dotted), 4/6 (green - dash-dotted), 5/7 (red - dashed), and 8/10 (black) of side/span (left). Quad perforated plate of 8/10 (black), 9/11 (green - dash-dotted), 10/12 (red - dashed), and 25/30 (blue - dotted) of side/span (right).



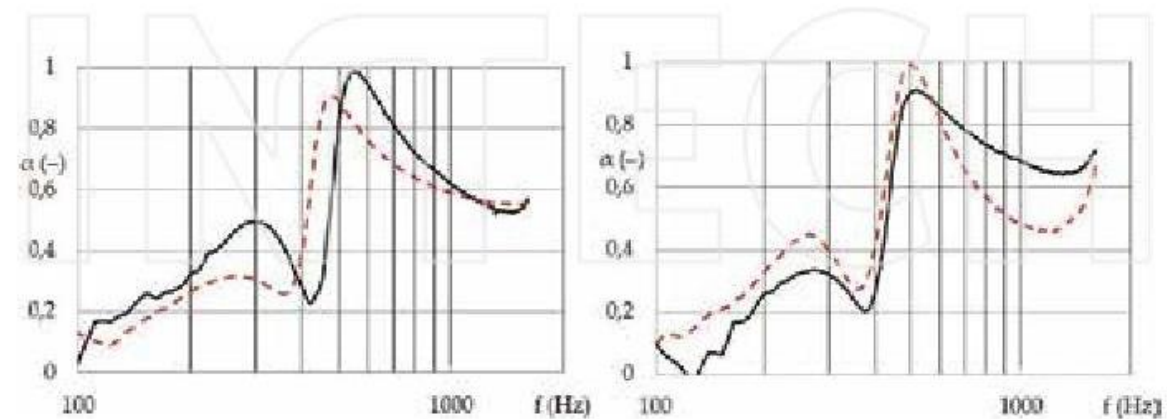
With an increasing size of quad hole, the sound absorption achieves the wide-frequency efficiency generally as can be seen in **Figure 6**. The best arrangement of quad hole seems to be 9-mm side of quad and the span of 11 mm (9/11), where the nanofibrous resonant membrane interacts with the perforated panel to achieve optimal parameters of the acoustic system.

Due to two effects, the large specific surface area of the nanofibers and also the ability of the nanofibrous layer to resonate at its own frequency, the nanofibrous membrane achieves broadband sound absorption compared to the narrowband effect of homogeneous foil on the same perforated plate (see **Figure 7**). Starting with 500 Hz, the sound absorption curve of nanofibers improved element is constant contrary of the unstable curve of foil improved perforated plate.

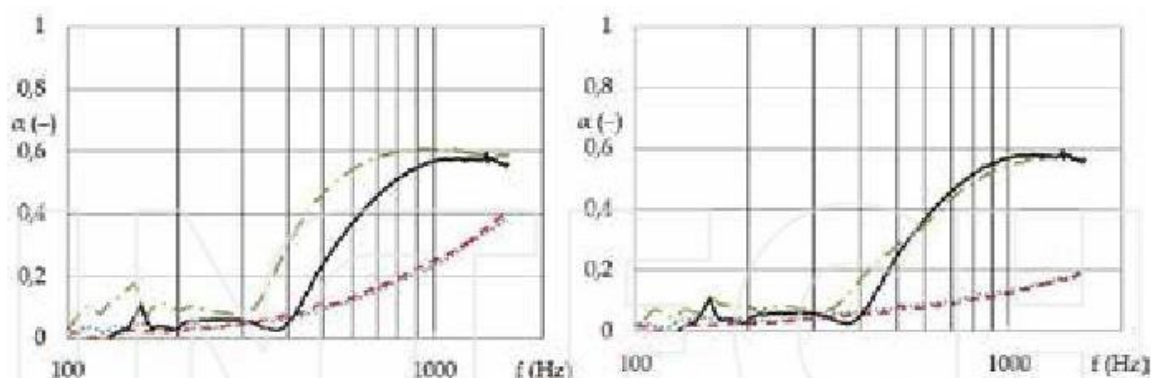
When the perforated plate is improved by the nanofibrous membrane on each of both sides, then the sound absorption of higher frequencies falls slightly (see **Figure 8**). Then, the



**Figure 7.** Frequency dependence of the sound absorption coefficient; quad perforated plate of 9/11 (left) and 10/12 (right) is covered by the nanofibrous membrane of 0.2 g/m<sup>2</sup> on a carrier of 25 g/m<sup>2</sup> (black) or foil of 7 g/m<sup>2</sup> (red – dashed) or foil of 40 g/m<sup>2</sup> (green - dash-dotted). The air gap between the 1-mm thick panel and the wall is 50 mm.



**Figure 8.** Frequency dependence of the sound absorption coefficient; quad perforated plate of 8/10 (left) and 10/12 (right) is covered at the top by the single nanofibrous membrane of 0.2 g/m<sup>2</sup> on a carrier of 25 g/m<sup>2</sup> (black) or it is covered by the nanofibrous membrane of 0.2 g/m<sup>2</sup> on a carrier of 25 g/m<sup>2</sup> (red – dashed) from both sides. The air gap between the 1-mm thick panel and the wall is 50 mm.



**Figure 9.** Frequency dependence of the sound absorption coefficient; quad perforated plate (9/11) covered by the nanofibrous membrane of  $0.2 \text{ g/m}^2$  on a carrier of  $25 \text{ g/m}^2$ . The air gap between the 1-mm thick panel and the wall is 20 mm (black); the same nanofibers-covering perforated plate filled (green - dash-dotted) by the foam (left) or fleece (right); the same separated plate filled (red - dashed) by the foam (left) or fleece (right); the separated fillings (blue - dotted) of foam (left) or fleece (right). The thickness of the whole acoustic system is 20 mm in all configurations.

membrane resonators covering the mass of Helmholtz's resonator obstruct the sound absorption inside the cavity.

The individual perforated plates in a form of cavity resonators should be filled for sound absorption of higher frequencies. **Figure 9** shows the comparison of acoustic system consisting of nanofibers-covering quad perforated plate and the same perforated plate without covering but filled. The filling has been chosen from the standard sound absorbers line. The first is melamine foam of  $9.5 \pm 1.5 \text{ kg/m}^3$  and 20-mm thickness (**Figure 9** on the left) and the second polyester fleece of  $24 \text{ kg/m}^3 \pm 10\%$  and 20-mm thickness (**Figure 9** on the right). From the comparison, it can be seen that the inferior sound absorption results if the perforated plate is filled (red - dashed curve) in comparison with nanofibers covering the same perforated plate without filling (black curve). Then, the resonance capability of nanofibrous membrane more than compensates a mass of filling. Regarding the applicability of nanofibers-covering perforated plate, the gap between the panel and the wall can be used for light or audio installation. If the nanofiber-covering plate is filled (green - dash-dotted curve), then the sound absorption is slightly better than that of non-filled. However, the benefit of air gap outweighs the nominal sound absorption growth.

#### 4. Conclusions

The resonance ability of nanofibrous layer has been verified in the last author's paper. The membrane has been exposed to plane sinusoidal sound wave and its deflection was picked by the high-speed digital camera. The resonant peaks of oscillating nanofibrous membrane as well as homogeneous membrane occur around 70–100, 300–400, and 550–600 Hz depending on their parameters. The calculated resonant frequency of the perforated plate is around 2–2.5 kHz. The sound absorption peaks of nanofibers-covering perforated plate are around 500 Hz. From the comparison of resonant frequencies perforated plate in a form of Helmholtz's resonator,

separate nanofibrous layer in a form of membrane resonator, and final nanofibers-covering perforated plate, the major effect of the resonant frequency of the nanofibrous layer together with a distance of the final plate from the wall can be seen.

The diameter of nanofibers, the basis weight, and the polymer of the nanofibrous membrane as well as the shape, size, and span of perforations of Helmholtz's resonator affect the sound absorption behavior of acoustic element.

The two applied nanofibrous membranes have not almost any effect on sound absorption. The improvement would be redundant.

## Acknowledgements

The results of this project LO1201 were obtained through the financial support of the Ministry of Education, Youth and Sports in the framework of the targeted support of the "National Programme for Sustainability I" and the OPR&DI project Centre for Nanomaterials, Advanced Technologies and Innovation CZ.1.05/2.1.00/01.0005. Particularly the work was supported by the Technology Agency of the Czech Republic within the project "Broadband components with resonant nanofibrous membrane for room acoustics" no. TH02020524. I also thank my doctoral student Tomas Ulrich for measurement support.

## Author details

Klara Kalinova

Address all correspondence to: [klara.kalinova@tul.cz](mailto:klara.kalinova@tul.cz)

Technical University of Liberec, Czech Republic

## References

- [1] Kolmer F, Kyncl J. *Prostorová Akustika* (in Czech). Prague: SNTL Praha; 1980. p. 244. ISBN: 04-514-80
- [2] Merhaut J. *Teoretické Základy Elektroakustiky* (in Czech). Vol. 3. Prague: Academia; 1976. p. 325
- [3] Škvor Z. *Akustika a Elektroakustika* (in Czech). Vol. 1. Prague: Academia; 2001. p. 527. ISBN: 80-200-0461-0
- [4] Asmatulu R, Khan W, Yildirim MB. Acoustical Properties of Electrospun Nanofibers for Aircraft Interior Noise Reduction [Online]. B.m.: ASME. 2009;2009:223-227. ISBN: 978-0-7918-4388-8. DOI: 10.1115/IMECE2009-12339



- [5] Kalinová K. Nanofibrous resonant membrane for acoustic applications. *Journal of Nanomaterials*. 2011;2011:1687-4129. ISSN: 1687-4110. DOI: 10.1155/2011/265720
- [6] Kimihiro S, Kiyama M, Morimoto M, Takahashi D. Sound absorption of a cavity-backed membrane: A step towards design method for membrane-type absorbers. *Applied Acoustics*. 1996;49(3):237-247. ISSN: 0003682X-4. DOI: 10.1016/S0003-682X(96)00025-4
- [7] Kimihiro S, Morimoto M, Yairi M. A note on the relationship between the sound absorption by microperforated panels and panel/membrane-type absorbers. *Applied Acoustics*. 2009;70(8):1131-1136. ISSN 0003-682X. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2009.03.003>
- [8] Hoda SS. Factors influencing acoustic performance of sound absorptive materials. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2009;3(4):4610-4617. ISSN 1991-8178
- [9] Rabbi A, Nasouri K, Shoushtari AM, Haji A. Fabrication of electrospun polyacrylonitrile and polyurethane nanofibers for sound absorption. In: 6th TEXTTEH International Conference; October 17–18, 2013; Bucharest, Romania. 2013. pp. 233-241. DOI: [https://www.academia.edu/download/45476648/FABRICATION\\_OF\\_ELECTROSPUN\\_POLYACRYLONITR20160509-22247-3x9zsf.pdf](https://www.academia.edu/download/45476648/FABRICATION_OF_ELECTROSPUN_POLYACRYLONITR20160509-22247-3x9zsf.pdf)
- [10] Randeberg RT. Perforated panel absorbers with viscous energy dissipation enhanced by orifice design [PhD thesis, dissertation]. NTNU Trondheim, 2000. Available from: [https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/249798/125365\\_FULLTEXT01.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/249798/125365_FULLTEXT01.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [11] Kobayashi Y, Hase S. Examination of a resonator system for sound power absorption by hall chairs in the low-frequency range. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1996;99:2459
- [12] Stauskis VJ. Sound absorption by a large-size isolated acoustic resonator with a cylindrical cavity. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1998;103(5):306
- [13] Chanaud RC. Effects of geometry on the resonance frequency of Helmholtz resonators. *Journal of Sound and Vibration*. 1994;178(3):337-348. DOI: 10.1006/jsvi.1994.1490
- [14] Kourosh T, Per G. Measurement of milling tool vibrations during cutting using laser vibrometry. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2008;48(3–4):380-387. ISSN: 08906955. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2007.09.009
- [15] Morteza K, Lu W, Dobrev I, Cheng JT, Furlong C, Rosowski JJ. Digital holographic measurements of shape and three-dimensional sound-induced displacements of tympanic membrane. *Optical Engineering*. 2013;52(10):101916. ISSN: 0091-3286. DOI: 10.1117/1.OE.52.10.101916
- [16] Elisabeth IC, Döllinger M, Schuster M, Eysholdt U, Bohr C. Multiparametric analysis of vocal fold vibrations in healthy and disordered voices in high-speed imaging. *Journal of Voice*. 2011;25(5):576-590. ISSN: 08921997. DOI: 10.1016/j.jvoice.2010.04.004

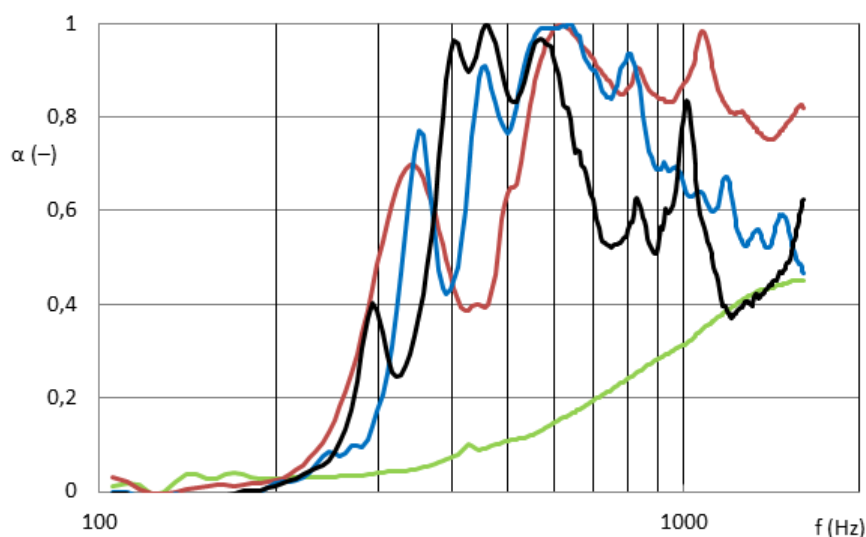
- [17] Weizhuo W, Mottershead JE, Ihle A, Siebert T, Schubach HR. Finite element model updating from full-field vibration measurement using digital image correlation. *Journal of Sound and Vibration*. 2011;**330**(8):1599-1620. ISSN: 0022460X. DOI: 10.1016/j.jsv.2010.10.036
- [18] Ishizu K, Yasui T, Ohashi M, Matsumoto N, Komune S. High-speed video analysis of acoustically oscillated guinea pig stapes. *The Journal of Laryngology & Otology*. 2015;**129**(2):S33-S37. ISSN: 0022-2151. DOI: 10.1017/S0022215114002357
- [19] Qican Z, Su X. High-speed optical measurement for the drumhead vibration. *Optics Express*. 2005;**13**(8):3110. ISSN: 1094-4087. DOI: 10.1364/OPEX.13.003110
- [20] Siebert T, Wood R, Splitthof K. High speed image correlation for vibration analysis. *Journal of Physics: Conference Series*. 2009;**181**:12064. ISSN: 1742-6596. DOI: 10.1088/1742-6596/181/1/012064
- [21] David Asael G-H, Perez Lopez C, Mendoza Santoyo F, Tellez-Quinones A, Aguayo DD. Optical characterization of a semisolid membrane by high speed interferometry. *Opto-electronics and Advanced Materials, Rapid Communications*. 2014;**8**(5-6):382-386. ISSN: 1842-6573
- [22] Majid N, Siddiqui K, Dargahi J. Measurement of the acoustic velocity field of nonlinear standing waves using the synchronized PIV technique. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2008;**33**(1):123-131. ISSN: 08941777. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2008.07.013
- [23] Ozturk MK, Kalinova K, Nergis B, Candan C. Comparison of resonant frequency of nanofibrous membrane and homogenous membrane. *Textile Research Journal*. 2013;**83**(20): 2204-2210. DOI: 10.1177/0040517513490064
- [24] Klara K, Ozturk MK, Komarek M. Open and closed tube method for determination of resonance frequencies of nanofibrous membrane. *The Journal of the Textile Institute*. 2016;**107**(8):1068-1078. DOI: 10.1080/00405000.2015.1083353
- [25] Maly M, Sejak P, et al. Method for Application of Liquid Polymeric Material onto Spinning Cords and a Device for Production of Nanofibers Through Electrostatic Spinning. Patent 2012, WO2012139533; 2012



## KAPITOLA IV: STRUKTURNÍ PARAMETRY NANOVLÁKENNÉ MEMBRÁNY

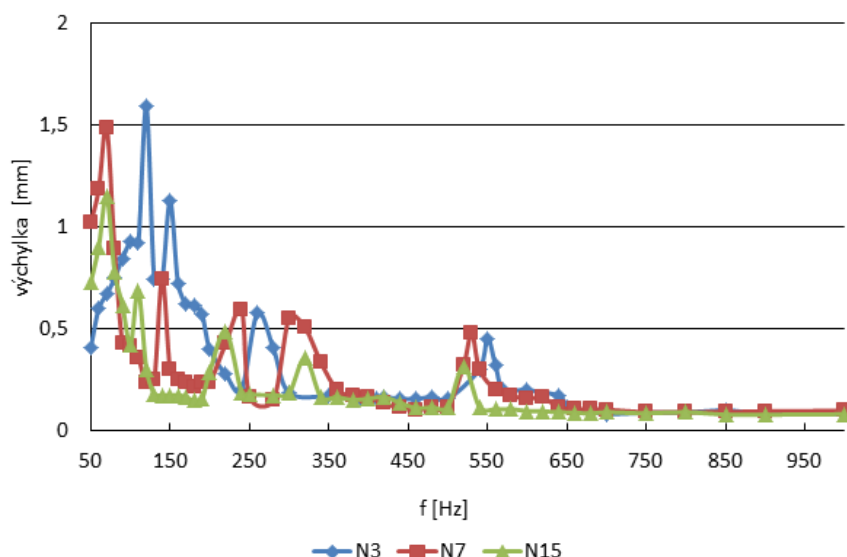
### IV.1. PLOŠNÁ HMOTNOST NANOVLÁKENNÉ MEMBRÁNY

Plošná hmotnost membrány je jedním z parametrů, které podle teoretických výpočtů ovlivňuje akustické chování prvku, kdy rezonanční frekvence membrány klesá s její stoupající plošnou hmotností, při neměnných ostatních proměnných (vztahy 2 a 3 uvedené v kapitole II). Tato závislost platí jak pro činitele zvukové pohltivosti (obraz 51), kde křivka vykazuje jisté peaky, které jsou přisuzovány právě chování akustického systému/materiálu v rezonanci, tak také pro výchylku membrány při jejím kmitání, která je maximální právě v rezonanci membrány (obraz 52). Obě metody pro stanovení akustického chování membránových systémů jsou popsány v předchozí kapitole I.



Obraz 51: frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti; Nanovrstva o různé plošné hmotnosti ( $0,2, 0,4, 1 \text{ g.m}^{-2}$ ) na nosiči (E) laminována na mřížku o tloušťce  $1\text{mm}$  a velikosti oka  $5,3 \times 5,2\text{mm}$ , resp.  $4,5 \times 4\text{mm}$  otvoru; měřeno ve vzdálenosti  $50\text{mm}$  od stěny. KŘIVKY: černá - N1E, modrá - N04E, červená - N02E, zelená - N0E (nosič bez nano).

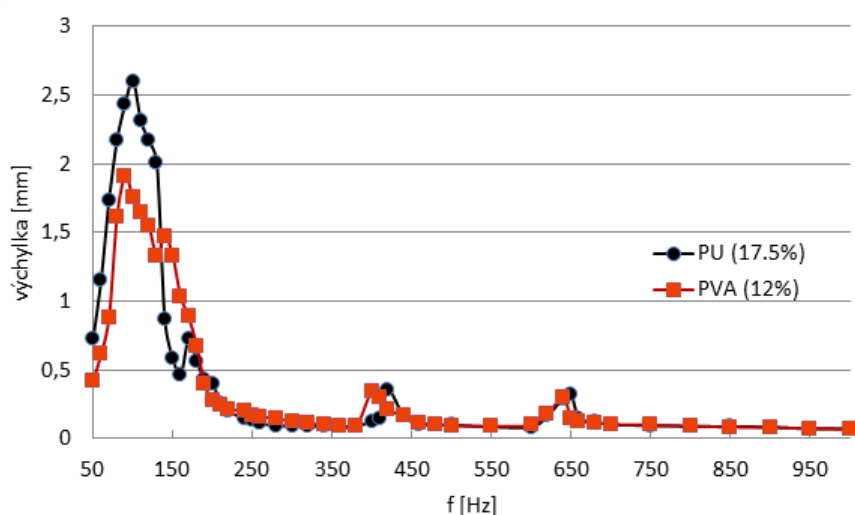




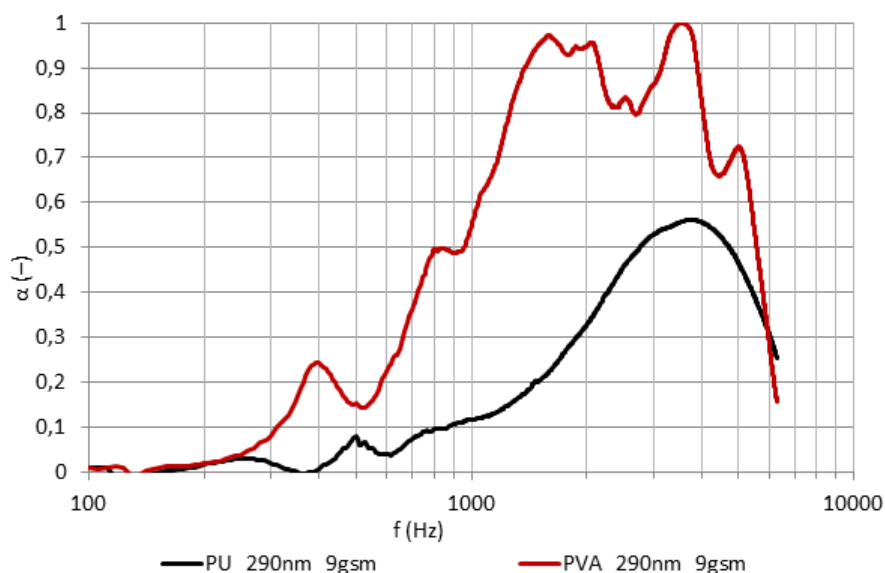
Obrázek 52: frekvenční závislost výchylky membrány; Nanovrstva o různé plošné hmotnosti ( $N=3, 7, 15 \text{ g.m}^{-2}$ ).

## IV.2. POLYMER NANOVLÁKENNÉ MEMBRÁNY

Nanovláknenná membrána vyrobená z PVA (polyvinylalkohol) při stejném buzení kmitá s menší výchylkou než ta vyrobená z PUR (polyuretan) (obráz 53), ale zvuk pohlcuje více (obráz 54), tzn. PUR je elasticitější a průchodu vzduchu při působení zvukové vlny je poddajnější, neklade takový odpor jako PVA stejné struktury.

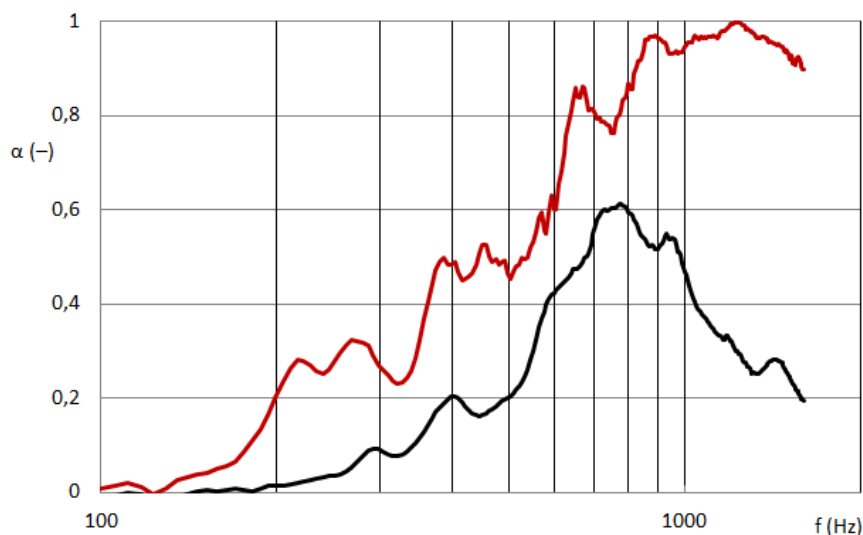


Obrázek 53: frekvenční závislost výchylky membrány; Nanovrstva vyrobená z různého polymeru (PVA, PUR) o shodné plošné hmotnosti  $9 \text{ g.m}^{-2}$ .



Obraz 54: frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti; Nanovrstva vyrobená z různých polymerů (PVA, PUR) o shodné plošné hmotnosti  $9 \text{ g.m}^{-2}$ ; měřena ve vzdálenosti 50mm od stěny.

Následuje porovnání akustického chování nanovláknenné vrstvy s fólií. Tenká membrána ve variantě nanovláknenné struktury o plošné hmotnosti  $0,2 \text{ g.m}^{-2}$  a homogenní strečové fólie o plošné hmotnosti  $7 \text{ g.m}^{-2}$  byla laminována na mřížku o tloušťce 1mm a velikosti oka  $2,5 \times 3 \text{ mm}$ , resp.  $2 \times 2 \text{ mm}$  otvoru; měřeno ve vzdálenosti 50mm od stěny. Hodnocené plošné hmotnosti nejsou shodné, avšak dle obrazu 55 je zřejmé, že nanovláknenná vrstva o několikanásobně menší plošné hmotnosti dokáže pohlcovat zvuk v širším frekvenčním spektru, než homogenní fólie.



Obraz 55: frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti; mřížka o tloušťce 1mm a velikosti oka  $2,5 \times 3 \text{ mm}$ , resp.  $2 \times 2 \text{ mm}$  otvoru laminována s nanovláknennou vrstvou, nebo homogenní strečovou fólií; měřeno ve vzdálenosti 50mm od stěny. KŘIVKY: černá - strečová fólie o plošné hmotnosti  $7 \text{ g.m}^{-2}$ , červená - nanovrstva o plošné hmotnosti  $0,2 \text{ g.m}^{-2}$ .

V následující publikaci jsou studovány možnosti změny struktury nanovlákněné membrány při zachování konstantní hmoty. Parametry nanovlákněné membrány nebyly optimalizovány z hlediska činitele zvukové pohltivosti, který byl v publikaci hodnocen pouze z hlediska ověření vlivu změny struktury na akustické chování membrány. Změna struktury nanovlákněné membrány má na základě tohoto experimentu nejasný vliv a na toto téma bude veden systematický výzkum. Vliv změny struktury při konstantní hmotě na rezonanční chování membrány bude ověřeno nejen pomocí křivky činitele zvukové pohltivosti, ale také pomocí měření výchylky některou z optických metod, uvedených v kapitole I.

- Mohrova, J., Kalinová K, „ Different Structures of PVA Nanofibrous Membrane for Sound Absorption Application“ *Journal of Nanomaterials*, vol. 2012, issue: Nanofiber Manufacture, Properties and Applications (NFMPA), Article ID 643043, 4 pages, **2012**. doi:10.1155/2012/643043; ISSN:1687-4110 (Print); ISSN: 1687-4129 (Online)
- Tématem strukturních parametrů membrány se dále zabývají následující publikace autorky:
- Merve Küçükali Öztürk, Banu Nergis, Cevza Candan and Klara Kalinova "Effect of Fiber Diameter and Air Gap on Acoustic Performance of Nanofibrous Membrane". *Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, Volume 9, Number 1, June **2015** (Serial Number 86), pp 45-50. ISSN:1934-7375. doi: 10.17265/1934-7375/2015.01.006
- Kalinová, K., Vaverka, J. Resonant Effect of Nanofibrous Sound Absorptive Material in Room Acoustics. *Building Research Journal*. vol. 57 (1), p 55-76 **2009**. ISSN: 1335-8863; ISSN: RC-MK-7094/MIC 49624

## Research Article

# Different Structures of PVA Nanofibrous Membrane for Sound Absorption Application

Jana Mohrova<sup>1</sup> and Klara Kalinova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Nonwovens, Faculty of Textile Engineering, Technical University of Liberec, Studentska 2, 46117 Liberec, Czech Republic

<sup>2</sup> Centre for Nanomaterials, Advanced Technologies and Innovations, Technical University of Liberec, Studentska 2, 46117 Liberec, Czech Republic

Correspondence should be addressed to Klara Kalinova, klara.kalinova@tul.cz

Received 12 December 2011; Revised 13 February 2012; Accepted 16 February 2012

Academic Editor: Tong Lin

Copyright © 2012 J. Mohrova and K. Kalinova. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

The thin nanofibrous layer has different properties in the field of sound absorption in comparison with porous fibrous material which works on a principle of friction of air particles in contact with walls of pores. In case of the thin nanofibrous layer, which represents a sound absorber here, the energy of sonic waves is absorbed by the principle of membrane resonance. The structure of the membrane can play an important role in the process of converting the sonic energy to a different energy type. The vibration system acts differently depending on the presence of smooth fibers in the structure, amount of partly merged fibers, or structure of polymer foil as extreme. Polyvinyl alcohol (PVA) was used as a polymer because of its good water solubility. It is possible to influence the structure of nanofibrous layer during the production process thanks to this property of polyvinyl alcohol.

## 1. Introduction

The porous fibrous materials, usually used for application in the sound absorption field, absorb sonic waves especially at higher frequencies. The work of Kalinova and Veverka [1] is concerned with topic of absorption the sonic waves by nonwoven materials at lower sound frequencies. The paper deals with a possibility of combining the effect of porous fibrous material and the effect of nanofibrous material which absorbs sound due to the vibration of the membrane. At the moment the sonic waves are in contact with the surface of thin nanofibrous membrane, there is the movement of membrane. The sound energy is converted to kinetic energy and partly to thermal energy. The nanofibers produced by electrospinning process have a large specific surface area [2]. Thanks to the large specific surface of fibers as well as small pores size, the nanofibrous layers have different properties in comparison with currently produced porous fibrous material.

The process parameters of electrospinning are important to the morphology of nanofibers [2]. The work of De Vrieze

et al. [3] describes the impact of temperature and relative humidity (RH) on fiber diameter. The fineness of fibers is possible to be affected by RH depending on the chemical nature of the polymer. The collection distance can be used to control the fibers diameter as well. For example, paper [4] describes the case of the decreasing diameter of nanofibers with increasing collection distance by using of PVA solution. With reference to the article [5], the influence of the tip-target distance to morphology of fibers is not critical. This work shows resulting values of average fiber diameter by application of various electrical potential in electrospinning process too.

Works [4, 6–8] describe effect of polymer solution concentration and its influence on nanofiber diameter by process electrospinning. The average diameter of nanofibers increases nonlinearly with increasing concentration of the solution. The interfiber spacing increases along with this [7]. Article [8] describes a correlation between molecular weight, concentration of solution and average fibers diameter. Type of polymer solution influences the morphology of electrospun fibers. The work [5] deals with an influence of solvent



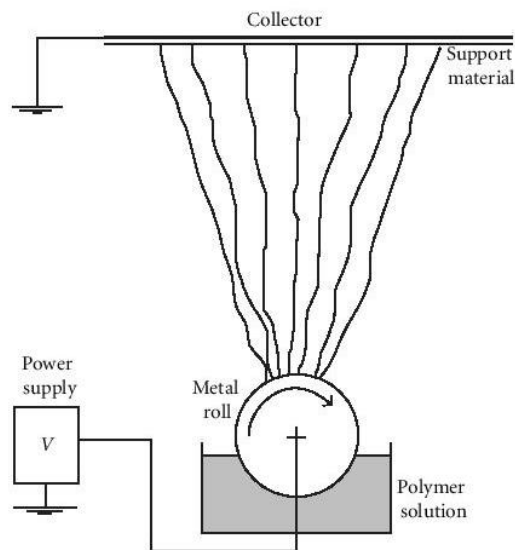


FIGURE 1: Production of nanofibers layer by electrospinning process.

used for polymer solution to the resultant fibers average diameters in nanofibers layer. This article shows the results of nanofiber parameters by using PVA dissolved in acetic acid and in second case solely aqueous solution of polyvinyl alcohol. In the first case the values of diameters were two times smaller in comparison with the aqueous solution.

The structure of thin nanofibrous membrane can vary as noted above, and therefore the sound absorption properties differ.

## 2. Experimental

**2.1. Materials.** The water solution of polyvinyl alcohol PVA ( $M_w = 130,000$  g/mol, degree of hydrolysis 88%) Soviol R 16 was purchased from the Novacke Chemické Zavody, a.s., Slovak Republic, and it was used for preparation of the solution for the experiment. The concentration of prepared PVA solution was 13 wt%. 40% aqueous solution of Glyoxal (7.5 wt %) and 85% phosphoric acid were added as crosslinking agents. The solution containing PVA, distilled water, glyoxal, and phosphoric acid was vigorously stirred at room temperature.

**2.2. Production of Thin Nanofibrous Membranes.** Technology of electrospinning was used for production of thin nanofibrous layers. The method of using a roll to carry out the polymer solution to collector was described in the patent [9]. Figure 1 indicates the production of electrospun fibers from the surface of the metal roll. The nanofibers are collected by support material. The distance between the surface of the roll and the collector was 10 cm. Voltage of 50 kV, relative humidity of RH 30%, and temperature of 22°C were applied during the course of electrospinning.

The final layer is crosslinked by hot air at temperature of 140°C for 7 min. The nanolayer (without support material)

is placed to a supporting frame. The structure and sound absorption have been evaluated. Then water vapour or liquid water was applied to these thin membranes. Difference between thin nanofiber membrane (Figure 2(b)) and thin polymeric foil (Figure 2(a)) is markedly observable by macroscopic analysis.

Series of attempts preceded the experiment with using of water vapour for change of structure of PVA nanofiber layer. There were used water vapour because the PVA is water soluble, and this gives possibility to change of membrane structure. Advantage is that the thin nanofiber layers were locked in frames (Figure 2) before application of water vapour. This gives us the opportunity to measure the values of sound absorption coefficient  $\alpha$  [—] for nanofiber layers and layers with partly merged fibers when using the same samples. This leads to minimization of potential changes of the other parameters of thin membrane (apart from the structure).

Water vapour was applied to the surface of nanolayer (for 10 to 120 seconds) in order to change the structure of membranes containing nanofibers (average diameter  $280 \pm 80$  nm). One file of samples was located into liquid (water) for 60 second. The mass area of PVA layer can be changed depending on the amount of glyoxal in polymer solution and time of water action. The fall of mass of PVA nanofiber layer depending on water action time is decreasing with increasing percent of glyoxal in PVA solution [2]. At this case higher weight percentage of glyoxal and short time of water action resulted in merged fibers to polymeric foil without significant weight loss.

**2.3. Characterization.** The scanning electron microscope (SEM) Desktop Phenom with BSE detector working at an acceleration voltage of 5 kV was used for characterization of morphology of nanofiber layers. The values of fiber diameters were obtained by image analyzer Lucia G. Calculation of the volume of surface pores [10] is not introduced because a cross-section of nanolayer can deform the in-process and it can distort the information about thickness of the membrane.

With two-microphone impedance tube Type 4206 with frequency range to 6.4 kHz, the values of sound absorption coefficient  $\alpha$  [—] were examined. The work [11] deals with a comparison of this method to another method of measurement and describes the absorption coefficient  $\alpha$  (value between 0 and 1).

## 3. Results

The area weight of all tested thin membranes is  $17 \pm 1$  g/m<sup>2</sup>. Differences between structures of thin membrane are shown in Figure 3. The amount of merged fibers increased with increasing time of water vapour action at the nanofiber layer.

Very important is the question of cross-section of thin membrane in connection with the inner structure of samples. The sample thickness was too small with prevented study of cross-section. If the merged fibers are contained in all membrane thickness, it could not be verified. However,



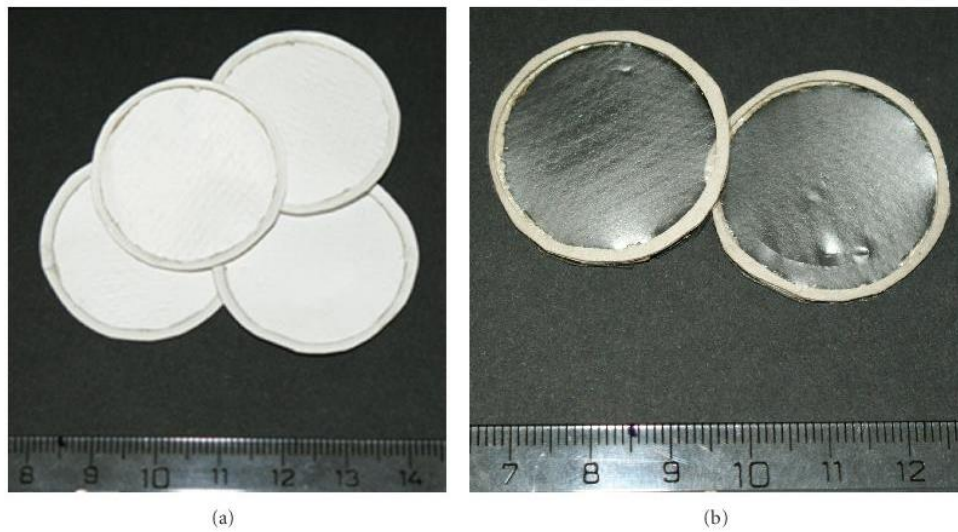


FIGURE 2: Thin nanofiber membranes (a) and thin polymeric foils (b) supported in frames.

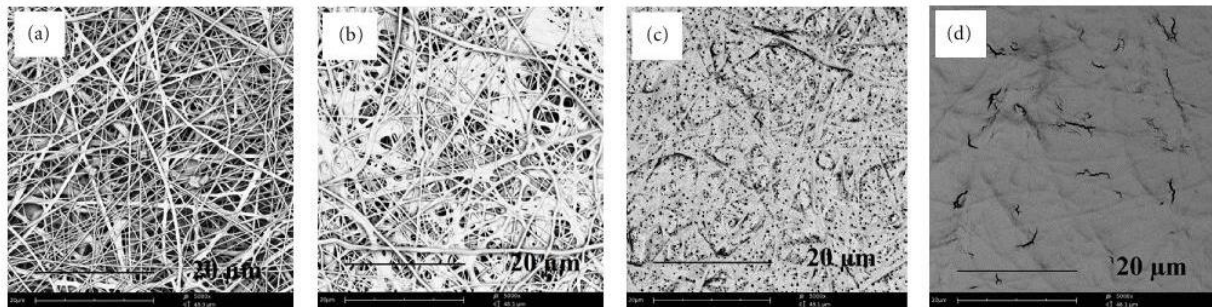


FIGURE 3: Image of surface of PVA nanofiber structures by scanning electron microscope SEM for layers after water vapour action during time of 60 seconds (b) and 120 seconds (c), without liquid water or water vapour action (a) and structure after action of water in the liquid condition to nanofiber layer during the time of 60 seconds (d). Magnification = 5000X and scale bar = 20  $\mu\text{m}$ .

method of put samples with frame into two-microphone impedance tube had to be try at range of samples which are not included in this experiment. By this way the impact low thickness of thin membrane and prospective influence to results were reduced as much as possible. Figure 4 pointed to the fact that the shapes of frequency functions are analogical for thin polymeric foil as well as for nanofiber PVA membrane. This result bears witness to the identity of parameters of both membranes (except the structure) as well as the prestressing of the membranes in frame.

The frequency range between 1.5 kHz and 3 kHz is examined because of the area weight of tested thin membranes ( $17 \pm 1 \text{ g/m}^2$ ). Resonant frequency of vibrating thin membrane is changed due to its area weight.

Structure of thin membrane after water vapour action contains local area weight irregularity which Figures 3(b) and 3(c) indicate. The thin membrane absorbs sonic waves by resonant principle hence the best at resonate frequency. The mass of thin membrane has influence to the resonate frequency of material. As the time of water vapour action to PVA nanofibers layer is increased, the number of local

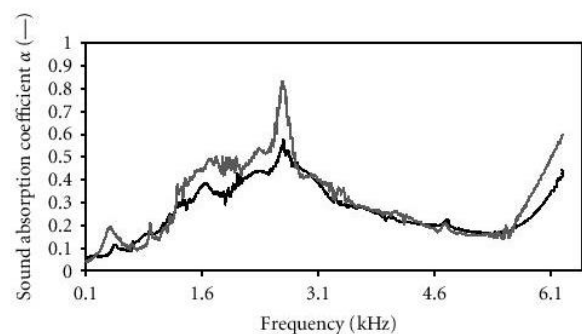


FIGURE 4: Sound absorption coefficient  $\alpha$  [—] as function of frequency [Hz] for thin PVA nanofiber membrane (black line— $\alpha_{\text{max}} = 0,58$ ) and for thin polymer foil (grey line  $\alpha_{\text{max}} = 0,83$ ).

place with different mass thanks dissolved and merged fibers should increase too. This effect has probably impact to resonant frequency of membrane as unit. Each part of material area resonate at a little bit different frequency

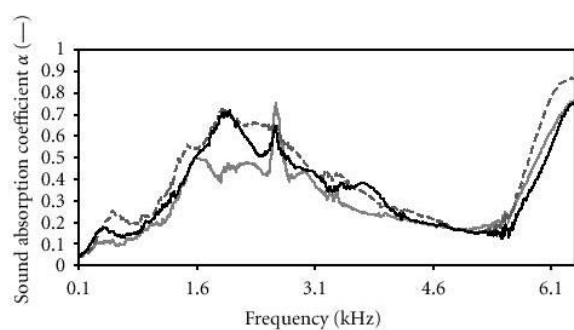


FIGURE 5: Sound absorption coefficient  $\alpha$  [—] as function of frequency [Hz] for PVA nanolayer contains various quantities of merged fibers. The time of water vapour action to nanofibers layers—30 seconds (grey line), 90 seconds (dashed grey line) and 120 seconds (black line).

because of local place and the irregularity of membrane (the above mentioned). This effect has impact on frequency range with good sound absorption which is possible to see in Figure 5. In case of thin polymer film it is possible to suppose lower weight irregularity and the sharp peak of function of frequency (Figure 4).

#### 4. Conclusions

The structure of thin membrane can have influence on the amount of absorbed acoustic energy. The possibility of a movement of nanofibers in structure and inner friction in polymer layer has an impact on the final absorption properties of the material. Results achieved for confrontation of polymeric foil and nanofiber membrane differed from the preceding research [12] probably because of the question of material rigidity.

With increasing irregularity in area of material surface, the absorbed frequency range is increased. But there is a limit when the irregularity goes down because of merged fiber majority (Figure 3(c)). In this case the absorbed frequency range comes to a peak again (Figure 5(a)).

#### Acknowledgment

The contribution was sponsored by the project of the Ministry of Industry and Trade (MPO), FR-TI3/621 “Nanovláknenné kompozitní textilie pro speciální filtrace”.

#### References

- [1] K. Kalinova and J. Veverka, “Resonant effect of nanofibrous sound absorptive material in room acoustics,” *Building Research Journal*, vol. 57, pp. 55–76, 2009.
- [2] B. Ding, H.-Y. Kim, S.-C. Lee, D.-R. Lee, and K.-J. Choi, “Preparation and characterization of nanoscaled polyvinyl alcohol fibers via electrospinning,” *Fibers and Polymers*, vol. 3, no. 2, pp. 73–79, 2002.
- [3] S. De Vrieze, T. Van Camp, A. Nelvig, B. Hagström, P. Westbroek, and K. De Clerck, “The effect of temperature and humidity on electrospinning,” *Journal of Materials Science*, vol. 44, no. 5, pp. 1357–1362, 2009.
- [4] P. Supaphol and S. Chuangchote, “On the electrospinning of poly(vinyl alcohol) nanofiber mats: a revisit,” *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 108, no. 2, pp. 969–978, 2008.
- [5] U. S. Sajeev, K. A. Anand, D. Menon, and S. Nair, “Control of nanostructures in PVA, PVA/chitosan blends and PCL through electrospinning,” *Bulletin of Materials Science*, vol. 31, no. 3, pp. 343–351, 2008.
- [6] T. Lin and X. G. Wang, “Controlling the morphologies of electrospun nanofibres,” in *Nanofibers and Nanotechnology in Textiles*, P. J. Brown and K. Stevens, Eds., pp. 90–110, CRC Press, New York, NY, USA, 1st edition, 2007.
- [7] A. Koski, K. Yim, and S. Shivkumar, “Effect of molecular weight on fibrous PVA produced by electrospinning,” *Materials Letters*, vol. 58, no. 3–4, pp. 493–497, 2004.
- [8] J. Tao and S. Shivkumar, “Molecular weight dependent structural regimes during the electrospinning of PVA,” *Materials Letters*, vol. 61, no. 11–12, pp. 2325–2328, 2007.
- [9] O. Jirsak, F. Sanetnik, D. Lukas et al., “Method of nanofibres production from a polymer solution using electrostatic spinning and a device for carrying out the method,” WO2005024101 (US2006290031), 2006.
- [10] D.-M. Wang, T.-T. Wu, F.-C. Lin, J.-Y. Hou, and J. Y. Lai, “A novel method for controlling the surface morphology of polymeric membranes,” *Journal of Membrane Science*, vol. 169, no. 1, pp. 39–51, 2000.
- [11] J. C. Le Roux, J.-P. Dalmont, and B. Gazengel, “A new impedance tube for large frequency band measurement of absorbing materials,” in *Proceedings of the American Institute of Physics (Acoustic '08)*, Paris, France, June 2008.
- [12] K. Kalinova, *Nanofibrous Material as a High-Efficient Sound Absorbent*, NANO FOR THE 3RD MILLENNIUM—NANO FOR LIFE, Prague, Prague, Czech Republic, 2007.

## KAPITOLA V: EDUKATIVNÍ SESTAVA

### V.1. SESTAVA PRO STANOVENÍ REZONANČNÍCH FREKVENCÍ TENKÝCH MEMBRÁN

Metody pro stanovení akustických charakteristik, uvedené v předchozí kapitole I., vyžadují nákladná a na obsluhu citlivá zařízení. Následující sestava, sloužící pro stanovení rezonančních frekvencí tenkých membrán v rámci výuky předmětu Aplikace nanomateriálů (NTI/ANO), byla proto navržena s požadavkem na jednoduchost obsluhy a atraktivnost experimentu zábavnou formou. Místo optických snímačů jemné výchylky membrán, byly použity polystyrenové kuličky (pro svou nízkou hmotnost a stálý tvar), které při vibraci membrány poskakují na jejím povrchu a opticky tak znásobují výchylku membrány tak, že rezonanční frekvence může být odhadnuta okometricky (obraz 57). Metoda, která má za úkol odhadnout frekvenci, při které je výchylka membrány největší, nemá zapotřebí přesně určit skutečnou hodnotu výchylky, proto je odhad frekvence, při které kuličky doskočí nejvýše, dostatečný.

#### Cíle úlohy

Membrána se při působení zvukové vlny viditelně rozkmitá, cílem je demonstrovat jak ovlivní parametry a struktura membrány její výchylku, resp. její rezonanční frekvenci. Experimentátor ovladačem postupně mění frekvence zvuku a pozoruje, při jaké frekvenci se membrána rozkmitá, resp. při které bude kmitat maximálně. Tato rezonanční frekvence bude zaznamenána. Sleduje postupně několik maxim, odpovídajících jednotlivým módům kmitů (obraz 56). Dále posunem pístu lze pozorovat, jestli změna rozměru prostoru (vnitřek trubice) ovlivní kmitání membrány resp. frekvenci, při které bude kmitat maximálně, s tím, že rezonanční frekvence membrány by neměla být ovlivněna prostorem. Parametry membrány a prostoru mohou být zvoleny následovně:

- struktura membrány může být: homogenní fólie, perforovaná fólie, nanovláknenná vrstva
- volitelné parametry membrány mohou být: napnutí resp. vypnutí na rámu (radiální napětí), ohybová tuhost, plošná hmotnost, tloušťka, velikost pórů, resp. průměr vláken, materiál, resp. polymer
- volitelná je výstupní strana trubice – otevřená, nebo zavřená
- volitelná je vzdálenost membrány od reproduktoru
- volitelná je vzdálenost membrány k výstupní straně zavřené trubice (řešeno pístem)

#### Úkoly

- znázornit a kmitny a uzly pro otevřenou a uzavřenou trubicí pro první tři módy
- vypočítat rezonanční frekvence otevřené a uzavřené trubice zadaných rozměrů
- naměřit rezonanční frekvence dané membrány v otevřené a uzavřené trubicí



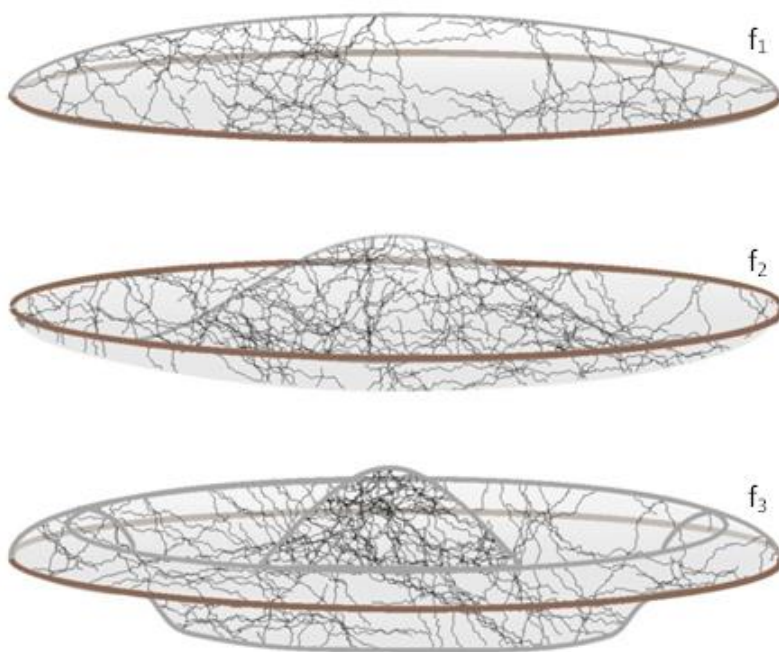
- porovnat rezonanční frekvence membrány naměřené v otevřené a uzavřené trubici vs. rezonanční frekvence prázdné trubice v obou nastaveních
- nastavit (pomocí pístu) takový rozměr trubice, aby pozice membrány odpovídala uzlu prázdné trubice (nejprve pro druhý, poté pro třetí mód), naměřit rezonanční frekvence dané membrány
- nastavit (pomocí pístu) takový rozměr trubice, aby pozice membrány odpovídala kmitně prázdné trubice (nejprve pro první, poté pro druhý mód), naměřit rezonanční frekvence dané membrány
- nastavit (pomocí pístu) takový rozměr trubice, aby pozice membrány neodpovídala uzlu, ani kmitně prázdné trubice (pro žádný z prvních třech módů), naměřit rezonanční frekvence dané membrány
- analyzovat výsledky

### Zadané vztahy

Výpočet rezonanční frekvence otevřené trubice  $f_o$  a rezonanční frekvence uzavřené trubice  $f_c$ :

$$f_o = (2n - 1) \frac{c}{4L}, \quad f_c = n \frac{c}{2L},$$

kde  $n$  je mód 1,2,3,...,  $c$  rychlost zvuku ve vzduchu [ $\text{m.s}^{-1}$ ],  $L$  délka trubice [m].



*Obraz 56: znázornění kmitání kruhové nanovlákněné membrány pro první tři módy  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ .*

### Zadané parametry

$c = 344 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $L = 1 \text{ m}$

## Seznam přístrojů

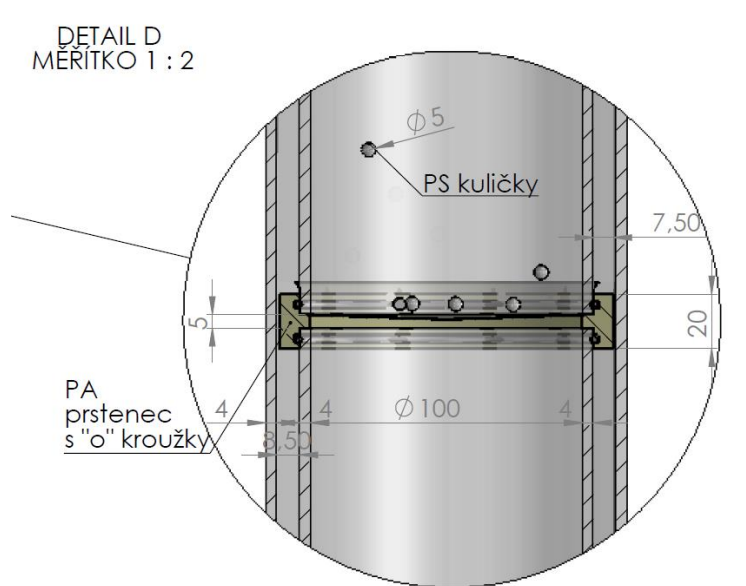
- průhledná trubice o průměru vnitřní stěny 100mm.
- audio signální generátor se zesilovačem (školní pomůcka)
- autoreproduktor (kruhový pro kruhovou trubici)
- případně osvětlení membrán



*Obraz 57: znázornění principu stanovení rezonančních frekvencí tenkých nanovláknenných membrán pomocí polystyrenových kuliček.*

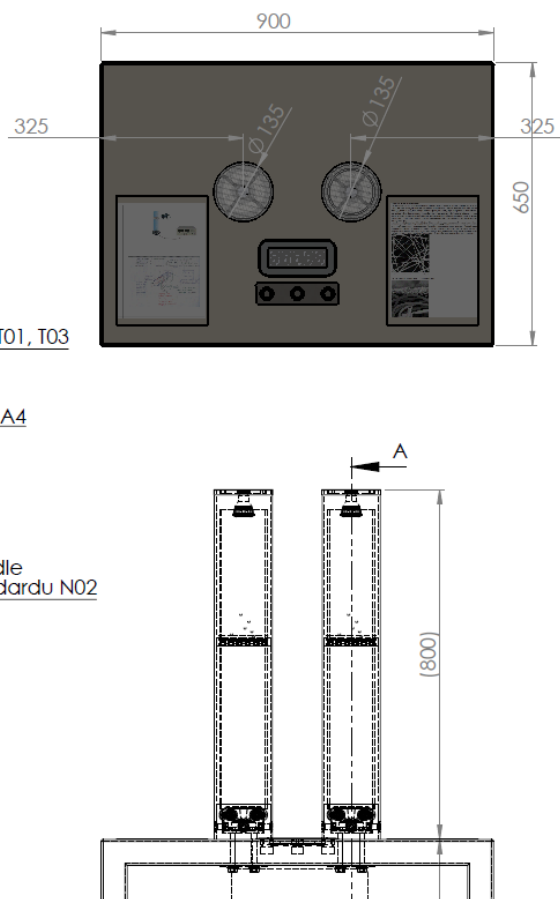
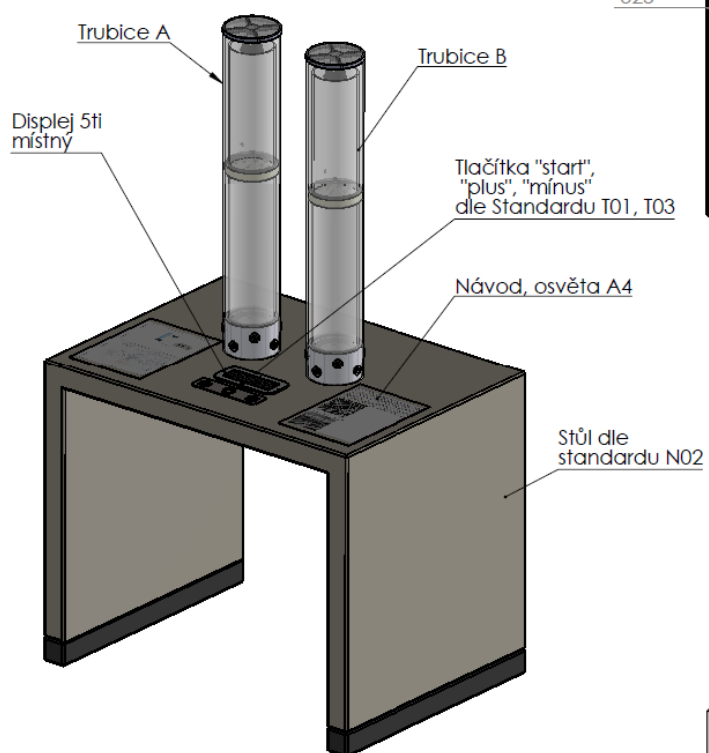
## V.2. EXPONÁT V IQ LANDII LIBEREC

Na základě výukové sestavy pro odhad rezonančních frekvencí tenkých membrán byl navržen a realizován exponát pro IQ Landii s cílem zábavnou formou přiblížit problematiku rezonančních membrán širší, zejména mladší veřejnosti. Nanovláknenná membrána, posypaná polystyrenovými kuličkami, se při působení zvukové vlny viditelně rozkmitá. Čím větší výchylka membrány, tím výše kuličky vyskočí (obraz 58). Cílem je demonstrovat, jak ovlivní parametry a struktura membrány právě její výchylku a také frekvenci, při které je kmitání maximální. Nanovláknenná membrána se, na rozdíl od běžné textilie, výrazně rozkmitá, což vede při jejím dalším zpracování do akustických prvků k vysoké pohltivosti zvuku. Na obrazech 59 a 60 je znázorněn návrh a vizualizace zařízení, které porovnává akustické chování membrány dvojího typu. Ve skutečném modelu byly použity 4 různá nastavení (obraz 61). Návštěvník stiskne tlačítko start, čímž spustí samotný exponát (rozsvítí se 5ti-místný displej a zapne se generátor tónů). Následně tlačítka "+" a "-" mění zvukovou frekvenci rozechvívající čtyři odlišné membrány ve čtyřech transparentních trubcích. Návštěvník si všímá rozdílného chování membrán při stejných vstupních podmínkách. Konstrukce je složena z vnitřní trubice z PMMA kryté vnější trubicí (trubka v trubce). Vnitřní trubice je servisně demontovatelná na dva díly, mezi díly se vkládá membrána, při spodním dně trubice je kruhový auto-reproduktor napojený na generátor tónů. Fixace membrány je realizována pomocí dvoudílného polyamidového prstence, který zároveň slouží ke spojení obou dílů vnitřní trubice. Generátor tónů je uschován v prostoru pod stolní deskou, je přístupný ze zadní strany exponátu po jeho odsunutí od stěny. Každá membrána je přisvícena shora LED světlem.



Obraz 58: detail uchycení membrány posypané polystyrenovými kuličkami uvnitř exponátu.

TÓNY, KTERÉ ROZKMITAJÍ MEMBRÁNU  
ILUSTRATIVNÍ TECHNICKÝ VÝKRES



Obraz 59: návrh a nákres exponátu.



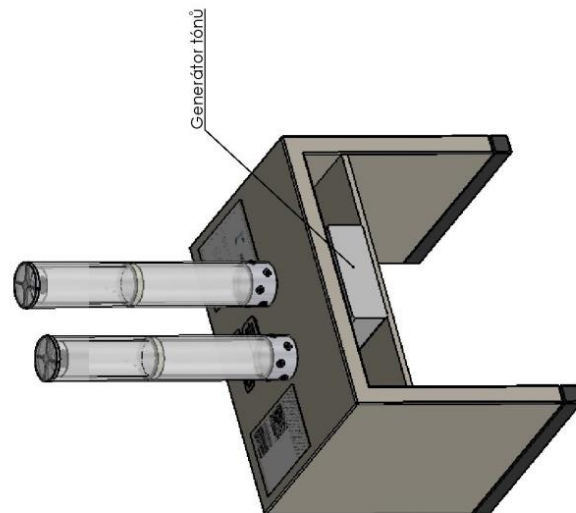
Obraz 60: vizualizace exponátu.





*Obraz 61: realizace exponátu umístěného v IQ Landii Liberec.*

Následuje přiložený technický nákres zařízení.



**DVĚKRY KONSTRUKCE SPODŘADNĚ**  
Dvákry konstrukce spodřadně testovacích trubic z PMMA krycích vnější trubici (trubka v trubici). Vnitřní trubice je servisně demontovatelná na dva díly, mezi díly se vkládá membrána (z nanotextilu, nebo papíru), přičemž spodní trubice je tržnou autokladem naplněná na generátor ionů. Fixace membrány pomocí skřepin přídutí polyamidový prstenec. – Iten zároveň slouží ke spojení obou dílů vnitřní trubice. Spojení dílů vnitřní trubice by mělo být pokud možno zvukotěsné, zde v návrhu je využito styku přes gumové "o" tržoučky.

Generátor tónů je uschován v prostoru pod stoliční deskou, je přístupný ze zadní strany expanditů po jeho odšroubování stěny. Každá membrána má přisvětlávací šňůra LED světlem napájeným k m krom šifrování rytmu. Trasy elektrika k reproduktorům vedou od generátoru přes skrz průchod elektrika v desce stolu (v osách trubici). Trasy elektrika k LED světlem vedou dle tónu, které vněší a vněší trubici, na odvrácené straně od navštívního

Tóny,	CTW00001	ktéré rozkmitaí membrár
-------	----------	-------------------------

[illegible]



## SOUČASNÝ A NAVAZUJÍCÍ VÝZKUM

V současnosti probíhá optimalizace navržených akustických prvků v rámci projektu TH02020524; TAČR Epsilon „Širokopásmové prvky prostorové akustiky s nanovláknennou rezonanční membránou“ na kterém autorka práce spolupracuje se studentem doktorského programu „Aplikované vědy v inženýrství“ (NTI, FM) Ing. Tomášem Ulrichem. Tento dvojčlenný tým se dále zabývá metodikou stanovení rezonančního chování nanovláknenných membrán, metodou stanovení a řízení radiálního napětí kruhové membrány, zkoumá vliv změny struktury při konstantní hmotě na rezonanční chování membrány. Radiální napětí kruhové membrány v  $[N.m^{-1}]$  ovlivňuje její rezonanční chování, stejně jako strukturní parametry materiálu, zejména pak plošná hmotnost. Napnutím membrány na kruhový rám radiálně působící silou (délkové napětí) získává membrána svou tuhost, kde  $F_r$  [N] je celková napínací síla a  $R$  [m] poloměr membrány [Škvor, 2001]

$$v = \frac{F_r}{2\pi R}, \quad (6)$$

Rychlost šíření zvukové příčné vlny  $C_M$   $[m.s^{-1}]$ , která je základem pro stanovení rezonanční frekvence tenké homogenní kruhové membrány dle vztahu (2), je dle vztahu (3) (oba uvedené v kapitole II) také funkcí radiálního napětí. Nastavení vhodné metodiky pro řízenou hodnotu radiálního napětí kruhové membrány je proto prioritou. Následovat bude další studium vlivu struktury NEhomogenní nanovláknenné membrány. První v pořadí je zvažováno studium homogenní membrány (fólie) s experimentálním řízením rezonančního chování membrány pomocí bodového závaží (kapka lepidla definované hmotnosti) do různých definovaných míst (uzel, kmitna) plochy membrány pro sledování změny rezonančního chování vzhledem k a/symetrii kmitů. Ze série bodů bude poté odvozena síťová struktura připodobněná té vláknenné. Porozita nanovláknenné vrstvy, dána poměrem objemu vzduchu ku objemu vláknenného útvaru [-], bude řízena pomocí vodného roztoku PVA (polyvinylalkohol) polymeru (ze kterého jsou PVA nanovláknena zvlákněna), kde při působení vlhkosti dochází k botnání vláken až do extrémní homogenní struktury (fólie). Vhodným prostředím, které udržuje definované procento relativní vlhkosti ve vzduchu, je možné řídit hodnotu porozity připravené vláknenné vrstvy v celém intervalu mezi extrémními hodnotami 0 a téměř 1. Rezonanční chování bude vždy vztaženo k definovanému tvaru plochy membrány, popsané v kapitole II. V další fázi bude studován vliv uspořádání a parametrů jednotlivých membrán ve více-membránovém prvku na akustické chování celku a na každou membránu zvlášť. Dominantní charakteristikou bude vzdálenost membrán ve vztahu k rezonanční frekvenci každé membrány. Výstupem poznatků by měla být další experimentálně-edukativní sestava, založená na sestavě a exponátu, popsaných v kapitole V.

Při zařazení více membrán za sebe (cca 3 díly) je cílem demonstrovat jak ovlivní jedna membrána tu další

- volitelný je druh membrán (parametry, struktura)
- volitelná vzdálenost mezi každou membránou
- volitelná vzdálenost okrajové membrány od reproduktoru a k výstupní straně trubice.



## LITERATURA

- Asmatulu, R., Khan, W., Yildirim, M., B. (2009). Acoustical Properties of Electrospun Nanofibers for Aircraft Interior Noise Reduction. ASME 2009 *International Mechanical Engineering Congress and Exposition* Volume 15: Sound, Vibration and Design. Florida, USA, November 13–19, 2009, ISBN 978-0-7918-4388-8), 223–227. DOI:10.1115/IMECE2009-12339
- Chanaud, R.C. (1994). Effects of Geometry on the Resonance Frequency of Helmholtz Resonators. *Journal of Sound and Vibration*, 178(3),337-348. DOI:10.1006/jsvi.1994.1490
- David Asael, G.,H., et.al. (2014). Optical characterization of a semisolid membrane by high speed interferometry. *Optoelectronics and Advanced Materials, Rapid Communications*, 8(5-6), 382–386. ISSN 1842-6573.
- De Vrieze, S., Van Camp, T., et al. (2009). The effect of temperature and humidity on electrospinning, *J. Mate. Sci.* 44, 1357-1362.
- Ding B, Kim HY, et al. (2002). Preparation and characterization of Nanoscaled Polyvinyl alcohol fibers via electrospinning, *Fibers and Polymers*; 3, 73-79.
- Elisabeth, I.,C., et al. (2011). Multiparametric Analysis of Vocal Fold Vibrations in Healthy and Disordered Voices in High-Speed Imaging. *Journal of Voice*, 25(5), 576–590. ISSN 08921997. DOI:10.1016/j.jvoice.2010.04.004
- Filová, E., Rampichová, M., et al. (2013). A cell-free nanofiber composite scaffold regenerated osteochondral defects in miniature pigs. *International Journal of Pharmaceutics*, 447, 139–149.
- Hirose, A., & Lonngren, K. E. (2010). *Fundamentals of Wave Phenomena* (2nd ed.). Raleigh: SciTech Publishing. ISBN: 978-1-891121-92-0.
- Hoda S. (2009). Factors influencing acoustic performance of sound absorptive materials. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 3(4), 4610–4617. ISSN 1991-8178.
- Huang, X. Y., Nguyen, N. T., Jiao, Z. J. (2007). Nonlinear standing waves in a resonator with feedback control. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 122, 38–41.
- Inwald, E. C., Döllinger, M., et al. (2011). Multiparametric analysis of vocal fold vibrations in healthy and disordered voices in high-speed imaging. *Journal of Voice*, 25, 576–590.
- Ishizu, K, T Yasui, et al. (2015). High-speed video analysis of acoustically oscillated guinea pig stapes. *The Journal of Laryngology & Otology*, 129(2), 33–37. ISSN 0022-2151. DOI:10.1017/S0022215114002357
- Jirsak, O., Kalinova, K., Stranska, D. (2006). Nanofibre technologies and nanospider applications. *Nanofair 2006, 5th International Nanotechnology Symposium*, Karlsruhe, ISSN 0083-5560, ISBN 3-18-091940-X.

- Jirsak, O, Sanetnik, F., et al. (2006). Method of nanofibres production from a polymer solution using electrostatic spinning and a device for carrying out the Metod, 2006-12-28. WO2005024101 (US2006290031)
- Kalinová, K. (2005). Zvuková pohltivost vlákenných materiálů s ohledem na charakteristiky struktury. TU v Liberci. ISBN 80-7083-997-X.
- Kalinova, K. (2006). Influence of nanofibrous membrane configuration on the sound absorption coefficient and resonant frequency, in *Proceedings of the 6th AUTEX World Textile Conference*, Raleigh, NC, USA.
- K. Kalinova, (2007). Nanofibrous Material as a High-Efficient Sound Absorbent, *Nano for the 3rd Millennium - Nano for Life*. 23-27. Prague November 2007, Prague, ISBN 978-80-254-0476-8.
- Kalinová, K. (2011). Nanofibrous resonant membrane for acoustic applications. *Journal of Nanomaterials*, Volume 2011 (2011), 6 pages. doi:10.1155/2011/265720
- Kalinova, K., O. Jirsak, O. (2005). Resonance effect of nanofibrous layer, in *Proceedings of the 5th AUTEX World Textile Conference*, Portoroz, Slovenia.
- Kalinova K, Kolek O. (2014). A sound absorbing means containing at least one cavity resonator. 2014-07-24, WO2014111068.
- Kalinova, K., Ozturk, M., K., Komarek, M. (2016). Open and closed tube method for determination of resonance frequencies of nanofibrous membrane. *The Journal of The Textile Institute*, 107(8), 1068–1078. DOI:10.1080/00405000.2015.1083353
- Kalinova, K., Veverka, J. (2009). Resonant effect of nanofibrous sound absorptive material in room acoustics, *Building Research Journal* 57 (2009), 55-76.
- Kim, S., Park, K. (2006). Electrostatic Spinning Equipment And Method Of Preparing Nano Fiber Using The Same, 2005-05-12, Wo2005042813
- Kobayashi, Y., Hase, S. (1996). Examination of a resonator system for sound power absorption by hall chairs in the low-frequency range. *J. Acoust. Soc. Am.* 99, 2459.
- Kolmer, F, Kyncl, J. (1980). *Prostorová akustika*. SNTL Praha, ISBN 04-514-80
- Koski, A., Yim, K., Shivkumar, S. (2004). Effect of molecular weight on fibrous PVA produced by electrospinning, *Mater. Lett.* 58 (2004), 493-497.
- Kourosh,T., Per, G. Measurement of milling tool vibrations during cutting using laser vibrometry. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 48(3–4), 380–387. ISSN 08906955. 10.1016/j.ijmachtools.2007.09.009

- Ozturk, K. M., Nergis B. U., et al. (2014). A study on the effect of fiber diameter on the acoustic behavior of the nanofibrous membrane. *The Fiber Society Spring 2014 International Conference – Regional Research Library-Liberec City Center*, May 21–23, 2014 Liberec, Czech Republic.
- Lambert R F, Tesar JS. (1984). Acoustic Structure and Propagation in Highly Porous, Layered, Fibrous Materials. *J. Acoust. Soc. Am.*, 76 (4), 1231-1237.
- Le Roux, J.C. et al. (2008). A new impedance tube for large frequency band measurement of absorbing materials, *Conference Acoustic'08 Paris*. June 29 - July 4. Paris.
- Lin T., Wang, X.G. (2007). Controlling the morphologies of electrospun nanofibres, in: P.J. Brown, K. Stevens (Eds.), *Nanofibers and nanotechnology in textiles*. 1 st ed., CRC Press LLC, USA, pp.90-110.
- Majid, N., Siddiqui, K., Dargahi, J. (2008). Measurement of the acoustic velocity field of nonlinear standing waves using the synchronized PIV technique. *Experimental Thermal and Fluid Science*; 33(1), 123–131. ISSN 08941777. DOI:10.1016/j.expthermflusci.2008.07.013
- Maly M., Sejak P., et al. (2012). Method for Application of Liquid Polymeric Material onto Spinning Cords and a Device for Production of Nanofibers Through Electrostatic Spinning. 2012-10-18 WO2012139533.
- Merhaut, J. (1976). *Teoretické základy elektroakustiky*. 3. Prague, Academia. 325.
- Mohrova, J., Kalinová K. (2012). Different structures of PVA nanofibrous membrane for sound absorption application. *Journal of Nanomaterials*, issue: Nanofiber Manufacture, Properties and Applications, 4 pages.
- Morteza, K., et al. (2013). Digital holographic measurements of shape and three-dimensional sound-induced displacements of tympanic membrane. *Optical Engineering*, 52(10), 101916. ISSN 0091-3286. DOI:10.1117/1.OE.52.10.101916
- Nabavi, M., Siddiqui, K., Dargahi, J. (2008). Measurement of the acoustic velocity field of nonlinear standing waves using the synchronized PIV technique. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33, 123–131.
- Onen, O., Caliskan, M. (2010). Design of a single layer micro-perforated sound absorber by finite element analysis. *Applied Acoustics*, 71, 79–85.
- Ozturk M. K., Kalinova K., et al. (2013). Comparison of resonant frequency of nanofibrous membrane and homogenous membrane structure. *Textile Research Journal*, 83, 2204–2210. doi:10.1177/0040517513490064
- Qican, Z., Su, X. (2005). High-speed optical measurement for the drumhead vibration. *Optics Express*, 13(8), 3110. ISSN 1094-4087. DOI:10.1364/OPEX.13.003110

Rabbi, A., et al. (2013). Fabrication of Electrospun Polyacrylonitrile and Polyurethane Nanofibers for Sound Absorption. In *6th TEXTEH International Conference*; October 17-18, 2013; Bucharest, Romania. p. 233–241.

DOI:[https://www.academia.edu/download/45476648/FABRICATION\\_OF\\_ELECTROSPUN\\_POLYACRYLONITRILE20160509-22247-3x9zsf.pdf](https://www.academia.edu/download/45476648/FABRICATION_OF_ELECTROSPUN_POLYACRYLONITRILE20160509-22247-3x9zsf.pdf)

Randeberg, R.T. (2000). *Perforated panel absorbers with viscous energy dissipation enhanced by orifice design*. PhD thesis, NTNU Trondheim. [https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/249798/125365\\_FULLTEXT01.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/249798/125365_FULLTEXT01.pdf?sequence=1&isAllowed=y).

Rossi, M. (1988). *Acoustics and Electroacoustics*. ISBN-10: 0890062552. Artech House, London.

Rothberg, S. J., Halkon, B. J., et al. (2012). Radial vibration measurements directly from rotors using laser vibrometry: The effects of surface roughness, instrument misalignments and pseudo-vibration. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 33, 109–131.

Sajeev, U.S., et al. (2008). Control of nanostructures in PVA, PVA/chitosan blends and PCL through electrospinning, *Bull. Mater. Sci.* 31, 343-351.

Sakagami, K., Kiyama, M., et al. (1996). Sound absorption of a cavity-backed membrane: a step towards design method for membrane-type absorbers, *Applied Acoustics*, 49(3), 237–247.

Sakagami, K., Kiyama, M., et al. (1998). Detailed analysis of the acoustic properties of a permeable membrane. *Applied Acoustics*, 54(2), 93-111. [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(97\)00085-6](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(97)00085-6)

Sakagami, K., Morimoto, M., Yairi, M. (2009). A note on the relationship between the sound absorption by microperforated panels and panel/membrane-type absorbers. *Applied Acoustics*, 70, 1131–1136.

Siebert, T, Wood, R., Splitthof, K. (2009). High speed image correlation for vibration analysis. *Journal of Physics: Conference Series*. 181(2009), 012064. ISSN 1742-6596. DOI:10.1088/1742-6596/181/1/012064

Škvor, Z. (2001). *Akustika a elektroakustika*. 1. vydání Academia Praha, ISBN 80-200-0461-0

Stauskis, V. J. (1998). Sound absorption by a large-size isolated acoustic resonator with a cylindrical cavity. *J. Acoust. Soc. Am.*, 103(5), 306.

Supaphol, P., Chuangchote, S. (2008). On the Electrospinning of Poly(vinyl alcohol) Nanofiber Mats: A Revisit, *J. Appl. Polym. Sci.* 108(2008) 969-978.

Švec, J. G., Schutte, H. K. (1996). Videokymography: Highspeed line scanning of vocal fold vibration. *Journal of Voice*, 10, 201–205.

Tao, J., Shivkumar, S. (2007). Molecular weight dependent structural regimes during the electrospinning of PVA, *Mater. Lett.* 61(2007) 2325-2328.



- Tatar, K., Gren, P. (2008). Measurement of milling tool vibrations during cutting using laser vibrometry. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48, 380–387.
- Verma, N. K., Kumar, S. (2006). Laser based optical sensor for vibration measurements. *NDT&E International*, 39, 106–108.
- Wang, D.,M., et al. (2000). A novel method for controlling the surface morphology of polymeric membranes, *J. Membr. Sci.* 169(2000), 39-51.
- Wang, W., Mottershead, J. E., et al. (2011). Finite element model updating from full-field vibration measurement using digital image correlation. *Journal of Sound and Vibration*, 330, 1599–1620.
- Weizhuo, W. et .al. (2011). Finite element model updating from full-field vibration measurement using digital image correlation. *Journal of Sound and Vibration*, 330(8), 1599–1620. ISSN 0022460X. DOI:10.1016/j.jsv.2010.10.036